

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

Факультет електроенерготехніки та автоматики

Кафедра теоретичної електротехніки

«На правах рукопису»
УДК 621.317.3

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

_____ М. Я. Островерхов

«__» _____ 20__ р.

Магістерська дисертація

на здобуття ступеня магістра

**зі спеціальності 141 Електроенергетика, електротехніка та
електромеханіка
на тему:**

**«Вплив навантажувальної ємності на характеристики високовольтного
однофазного випрямляча з подвоєнням напруги»**

Виконав:

студент VI курсу, групи ЕВ-71мп
Компаніченко Михайло Валентинович _____

Керівник:

Професор кафедри теоретичної електротехніки,
д.т.н, професор, Бржезицький В. О. _____

Консультант з маркетингу:

Ст. викладач кафедри промислового маркетингу, к.е.н.,
Царьова Т. О. _____

Рецензент: _____

Засвідчую, що у цій магістерській
дисертації немає запозичень з праць
інших авторів без відповідних
посилань.

Студент _____

Київ – 2018 року

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Факультет електроенерготехніки та автоматики
Кафедра теоретичної електротехніки

Рівень вищої освіти – другий (магістерський) за освітньо-професійною програмою

Спеціальність (спеціалізація) – 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» («Техніка та електрофізика високих напруг»)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Заступник директора

ТОВ «ІНТЕЛТЕХ»

_____ О. А. Філонова

«___» _____ 20__ р.

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ М. Я. Островерхов

«___» _____ 20__ р.

ЗАВДАННЯ
на магістерську дисертацію студенту
Компаніченку Михайлу Валентиновичу

1. Тема дисертації «Вплив навантажувальної ємності на характеристики високовольтного однофазного випрямляча з подвоєнням напруги», науковий керівник дисертації Бржезицький Володимир Олександрович, д.т.н., професор, затверджені наказом по університету від «07» листопада 2018 р. №4107-с

2. 19.12.2018 р

3. Спеціалізований високовольтний випрямляч високої напруги з лінійним та нелінійним навантаженням

4. Середнє значення випрямленої напруги 30000 В. кількість стабілітронів типу Д 818Д – 3300; омичне навантаження – 12 МОм; частота – 50 Гц; тип схеми випрямляча – Грейнахера-Латура з додатковим R,C фільтром.

5. Огляд високовольтних джерел напруги, Теоретичний аналіз процесів у спеціалізованому високовольтному випрямлячі з подвоєнням напруги, Аналіз впливу навантажувальної ємності на характеристики високовольтного випрямляча високої напруги з лінійним та нелінійним навантаженням, Стартап – проект. впровадження аналізу залежності впливу навантажувальної ємності на характеристики спеціалізованого високовольтного однофазного

випрямляча з подвоєнням напруги та використання його удосконаленої моделі

6. Схема високовольного випрямляча. Формула розрахунку. Таблиця кінечних результатів. Висновки

8. Консультанти розділів дисертації

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Маркетинг високовольного обладнання	Царьова Т. О., ст. викладач кафедри промислового маркетингу		

9. Дата видачі завдання 20.10.2018

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Термін виконання етапів магістерської дисертації	Примітка
	Огляд високовольних джерел напруги	Вересень 2018	Виконано
	Теоретичний аналіз процесів у спеціалізованому високовольному випрямлячі з подвоєнням напруги	Жовтень 2018	Виконано
	Аналіз впливу навантажувальної ємності на характеристики високовольного випрямляча високої напруги з лінійним та нелінійним навантаженням	Листопад 2018	Виконано
	Стартап – проект. впровадження аналізу залежності впливу навантажувальної ємності на характеристики спеціалізованого високовольного однофазного випрямляча з подвоєнням напруги та використання його удосконаленої моделі	Грудень 2018	Виконано

Студент

М. В. Компаніченко

Науковий керівник дисертації

В. О. Бржезицький

Реферат

Магістерська дисертація складається з пояснювальної записки та графічної частини. Пояснювальна записка виконана на 92 сторінках формату А4, яка включає в себе 25 малюнків, 15 таблиць, 18 джерел використаної літератури, презентація містить слайдів. 9

В магістерській дисертації розглядається розробка аналізу впливу навантажувальної ємності на характеристики спеціалізованого високовольтного випрямляча.

Актуальність теми. Високовольтні джерела живлення все більш широко використовуються в електротехнологічних установках (електрофільтри, електрофарбування, нанесення порошкових покриттів). Проте розрахунок їх режимів виконується наближено, з використанням значних «запасів» по параметрах елементів, наприклад ємності конденсаторів. Це призводить до збільшення їх вартості, а отже обмежує застосування перспективних електротехнологічних установок. В даній роботі на основі розвинутої теорії режимів спеціалізованого високовольтного випрямляча з подвоєнням напруги, одержані нові результати по впливу навантажувальної ємності на характеристики високовольтного джерела живлення.

Методи, використовувані в магістерській дисертації:

- методи теорії електричних кіл;
- методи математичного моделювання перехідних процесів;
- методи побудови систем лінійних та нелінійних рівнянь;
- методи рішення систем лінійних та нелінійних рівнянь.

Об'єкт дослідження: спеціалізований високовольтний випрямляч високої напруги з лінійним та нелінійним навантаженням.

Предмет дослідження: вплив навантажувальної ємності на характеристики високовольтного випрямляча високої напруги з лінійним та нелінійним навантаженням.

Наукова новизна результатів полягає в тому, що вперше на основі вирішення системи рівнянь достовірної математичної моделі одержані наукові результати, що показують можливість зменшення значень навантажувальної ємності при збереженні показників якості електроенергії в нормованому діапазоні.

Практична цінність проведеної розробки обумовлюється можливістю суттєвого зменшення собівартості високовольтних джерел живлення на основі спеціалізованого високовольтного випрямляча з подвоєнням напруги.

Ключові слова: Висока напруга змінного струму, частота 50 Гц, високовольтні діоди, зарядна ємність, фільтрова ємність, навантажувальна ємність, стабілітрони, резистивне навантаження.

Зміст

ЗАВДАННЯ на магістерську дисертацію студенту	2
Реферат.....	5
1 ОГЛЯД ВИСОКОВОЛЬНИХ ДЖЕРЕЛ НАПРУГИ.....	2
1.1 Загальне використання генераторів.....	2
1.2 Схема однопівперіодного випрямлення	18
1.3 Схеми двопівперіодного випрямлення.....	18
2 ТЕОРЕТИЧНИЙ АНАЛІЗ ПРОЦЕСІВ У СПЕЦІАЛІЗОВАНОМУ ВИСОКОВОЛЬТНОМУ ВИПРЯМЛЯЧІ З ПОДВОЄННЯМ НАПРУГИ....	28
3 АНАЛІЗ ВПЛИВУ НАВАНТАЖУВАЛЬНОЇ ЄМНОСТІ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ВИСОКОВОЛЬТНОГО ВИПРЯМЛЯЧА ВИСОКОЇ НАПРУГИ З ЛІНІЙНИМ ТА НЕЛІНІЙНИМ НАВАНТАЖЕННЯМ.....	28
4 СТАРТАП – ПРОЕКТ. ВПРОВАДЖЕННЯ АНАЛІЗУ ЗАЛЕЖНОСТІ ВПЛИВУ НАВАНТАЖУВАЛЬНОЇ ЄМНОСТІ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ СПЕЦІАЛІЗОВАНОГО ВИСОКОВОЛЬТНОГО ОДНОФАЗНОГО ВИПРЯМЛЯЧА З ПОДВОЄННЯМ НАПРУГИ ТА ВИКОРИСТАННЯ ЙОГО УДОСКОНАЛЕНОЇ МОДЕЛІ.....	28
5. ВИСНОВКИ.....	28
2 СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ.....	28

Розділ 1

ОГЛЯД ВИСОКОВОЛЬНИХ ДЖЕРЕЛ НАПРУГИ

1.1 Загальне використання генераторів

Багато електротехнічних пристроїв і технологічних процесів пов'язано з використанням сильних електростатичних полів та енергії постійного струму високої напруги. До них належать пристрої прямого прискорення заряджених частинок, генератори, призначені для випробування ізоляції електроустаткування ЛЕП постійного струму, блоки живлення радіотехнічних схем, промислових фільтрів, рентгенівських апаратів і томографів, установок магнітоімпульсної обробки металів, електронно-іонної технології, зарядних пристроїв ємнісних нагромаджувачів енергії тощо.[1]

Ми можемо визначати найефективнішу для конкретних цілей схему проводячи аналіз слабких та сильних сторін високовольтних пристроїв, зокрема високовольтних випрямлячів, ми можемо бачити що на вибір елементів, таких як діоди, впливає не тільки значення допустимого струму, зворотньої напруги, на необхідність встановлення обмежувальних резисторів, в залежності від умов їх встановлення, напруги, втрат, роботи у схемі небажаного підмагнічення сталі трансформатора, тощо. [1]

Розглянемо двотактну схему подвоєння напруги що дає змогу отримати симетричну напругу відносно заземленої точки.

Постійну високу напругу одержують з допомогою різноманітних схем випрямлення змінної напруги, основними елементами яких є високовольтний трансформатор, конденсаторно-діодна група, фільтр вищих гармонік і струмообмежувальні резистори. [1]

Схеми за числом фаз напруги живлення поділяють на одно-, дво-, трифазні, і.т.д.; за числом півперіодів змінної напруги, що використовуються, – на одно- і двопівперіодні; за співвідношенням між значеннями вихідної і

вихідної напруги випрямляча – на схеми подвоєння, потроєння, множення. [1]

Аналізуючи переваги і недоліки випрямних високовольтних пристроїв шляхом порівняння однотипних схем (наприклад, подвоєння напруги), слід звертати увагу: на вибір діодів не тільки за значенням допустимого прямого струму, а й за значенням зворотної напруги; на необхідність встановлення струмообмежувальних резисторів; на вибір напруги конденсаторів залежно від умов їх роботи у схемі; на можливість небажаного підмагнічування сталі трансформатора сталою складовою магнітного потоку; на значення вихідного опору схеми і можливість її поєднання з навантаженням; на пульсацію вихідної напруги; на можливість заземлення потрібної точки схеми без погіршення роботи випробного трансформатора та умов роботи навантажувального опору. [1]

1.2 Схема однопівперіодного випрямлення

Схема однопівперіодного випрямлення (рис.1) складається з мінімальної кількості елементів і входить як складова частина у більшість складніших випрямних схем. [1]

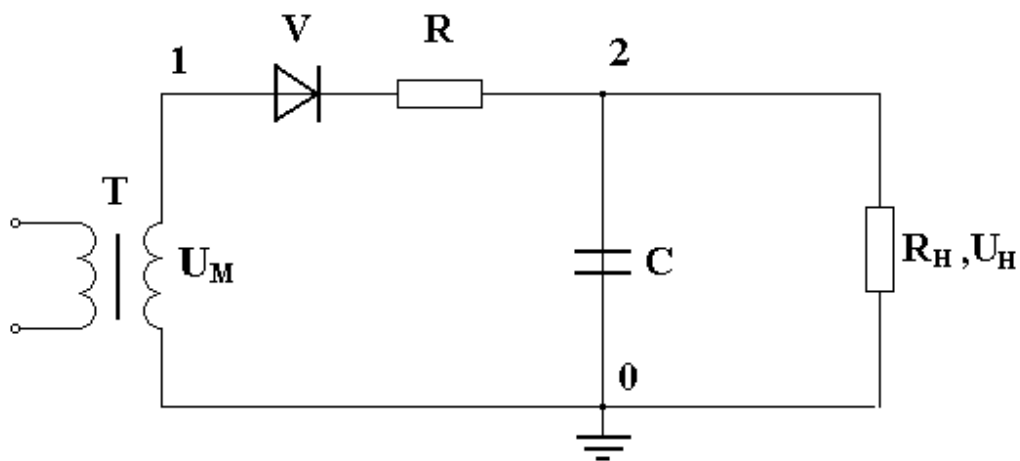


Рисунок 1 – Схема однопівперіодного випрямляча [1]

Осцилограми напруг у найхарактерніших точках схеми і струму в обмотці ВН трансформатора за синусоїдальної форми напруги у точці 1 при роботі схеми на навантажувальний опір R_H показано на рис.2. [1]

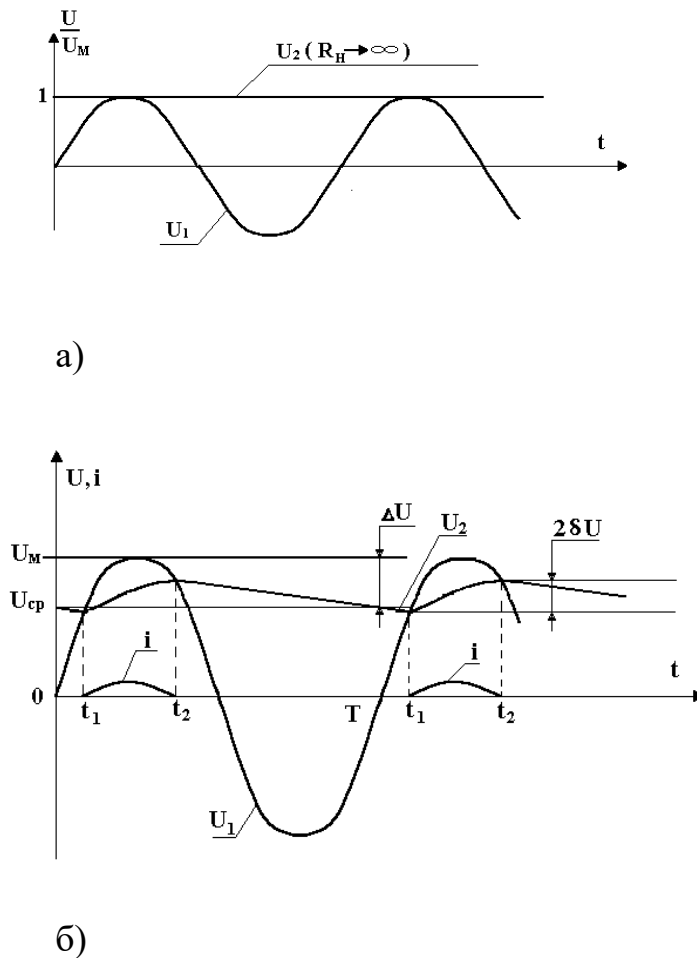


Рисунок 2 – Осцилограми потенціалів точок 1 і 2 схеми, показаної на рис. 2: а – у режимі холостого ходу; б – у навантажувальному режимі [1]

У режимі холостого ходу ($R_H \rightarrow \infty$) конденсатор C за відсутності саморозряду зарядиться до амплітудного значення - напруги на стороні ВН (U_M) трансформатора Т (рис.2а).

Струмообмежувальний опір R вибирають, виходячи з умови $R = U_M / I_m$, де I_m – короткочасно допустимий прямий струм діода V . У навантажувальному режимі діод відкритий в інтервалах $t_2 - t_1$, коли потенціал анода діода вищий за потенціал катода. Падіння напруги на резисторі R перешкоджає зарядці конденсатора за час $t_2 - t_1$ до напруги U_M . У час, що залишається на протязі кожного періоду, діод запертий і конденсатор C розряджається на опір [1]

навантаження R_n , що призводить до пульсації випрямленої напруги з частотою живильної мережі.

Напруга на діоді у режимі холостого ходу (різниця потенціалів $U_2 - U_1$, рис.2а) пульсує від нуля до $2U_m$. Виходячи з цього, зворотна напруга діода має перевищувати $2U_m$. Робочу напругу конденсатора вибирають такою, що дорівнює U_m . У навантажувальному режимі сталь магнітопроводу підмагнічується сталою складовою магнітного потоку, що слід враховувати під час вибору потужності трансформатора. Частота пульсації вихідної напруги збігається з частотою мережі. Схема допускає одночасне заземлення обмотки ВН трансформатора і навантаження. [1]

Вихідний опір джерела напруги має бути мінімальним. У протилежному разі навантажувальна характеристика $U_n = f(I_n)$ спадає при зростанні сили струму навантаження (зменшення R_n). Внутрішнє падіння напруги в однопівперіодній випрямній схемі

$$\Delta U = U_m - U_{cp} = U_m(1 - U_{cp}/U_m)$$

визначають з допомогою номограми (рис.3) залежно від добутку $\omega R_n C$ і відношення R/R_n .

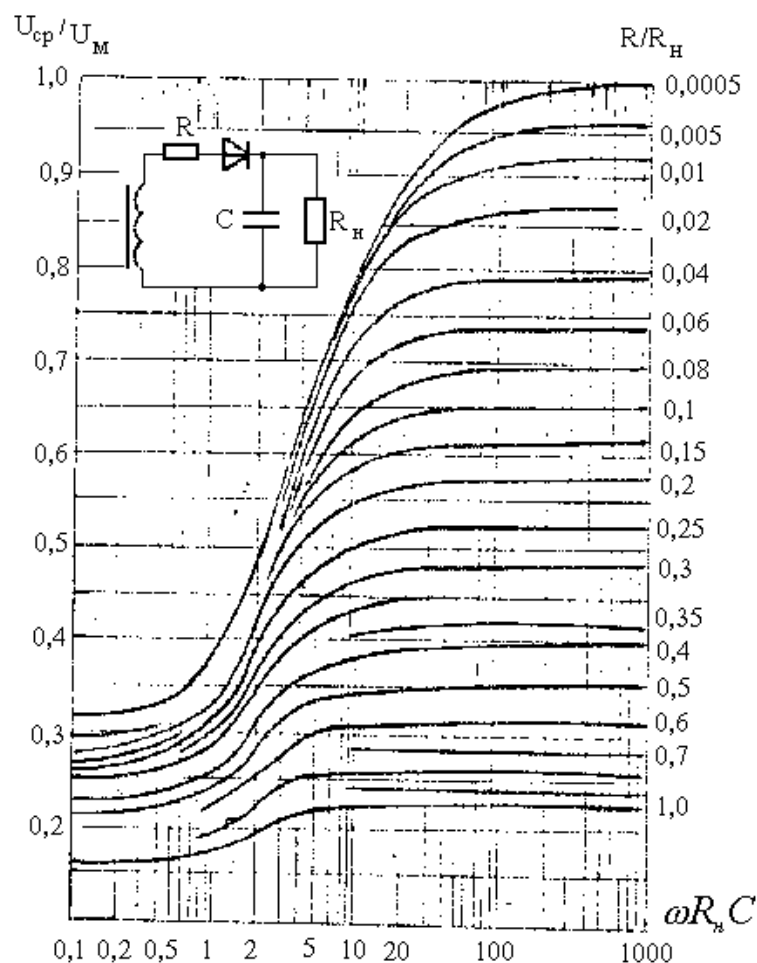


Рисунок 3 – До визначення внутрішнього падіння напруги у схемі рис. 1[1]

З аналізу кривих рис.3, випливає, що рівність амплітудного значення напруги обмотки ВН трансформатора і напруги на навантаженні виконується, якщо $\omega R_n C \geq 400$ та $R/R_n \leq 0,0005$, де значення R_n наведені в [Ом]; C – в [Ф]; ω – в $[с^{-1}]$. На перший погляд здається, що схему однопівперіодного випрямлення з ємнісним виходом можна використати як джерело пульсуючої напруги, якщо навантаження приєднати паралельно діоду згідно з рис.4. [1]

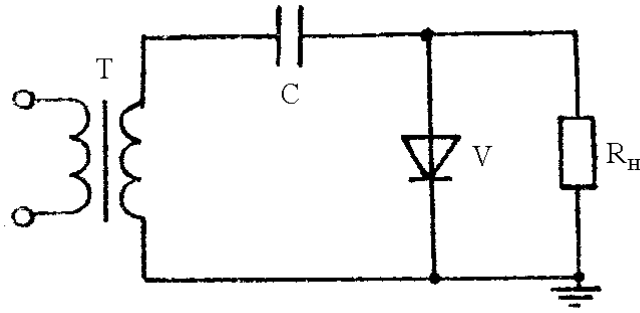
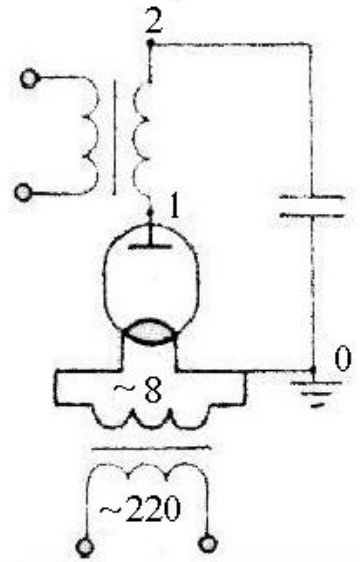


Рисунок 4 – Схема джерела пульсуючої напруги з великим вихідним опором[1]

Проте через значний вихідний опір, сумірний із внутрішнім опором запертого діода, ця схема з високоомним навантаженням застосовується доволі обмежено.

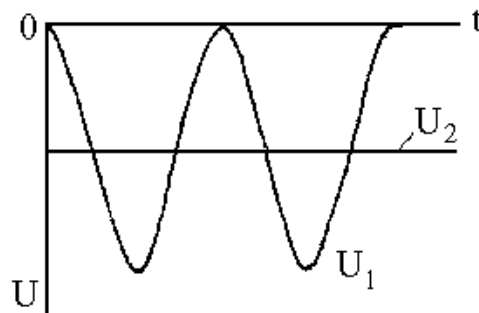
Як відомо, заземлення будь-якої точки ізолюваної системи електроживлення не змінює напругу і силу струму навантаження. Однак при цьому не слід забувати, що від місця заземлення системи залежать потенціали інших її вузлів. (Дайте відповідь на запитання. Чому позитивні властивості системи з ізолюваною нейтраллю не поширюються на лінії класів напруги, що перевищують 35 кВ?). Якщо до схеми однопівперіодного випрямляча (див. рис.1) замість напівпровідникового діода ввімкнути випрямлювальну лампу – кенотрон, його катод опиниться під високим потенціалом. Проблема живлення розжарення кенотрона у цьому разі полягає у подачі під високий потенціал U_n невеликої (6 – 8 В) різниці потенціалів, що виконують за допомогою спеціального знижувального трансформатора розжарення, головну ізоляцію якого розраховують на напругу U_n . [1]

На рис.5а зображено електричну схему, що використовує розжарення кенотрона, і яке здійснюється в ній використовуючи низьковольтний знижувальний трансформатор, а на рис. 5б – осцилограми потенціалів точок



1 і 2 схеми.

а)



б)

Рисунок 5 – Схема вмикання кенотрона у нейтраль трансформатора (а)
та осцилограми потенціалів точок 1 і 2 (б)

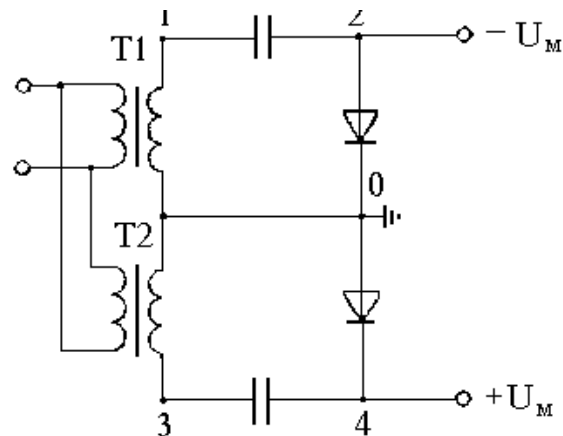


Рисунок 6 – Послідовне з'єднання двох схем пульсуючої напруги

За узгодженого вмикання трансформаторів вихідна напруга у режимі холостого ходу пульсує від нуля до $4U_M$. На рис.6 трансформатори T1 і T2 ввімкнено зустрічно і напруга на виході становить $2U_M$.

1.3 Схеми двопівперіодного випрямлення

Місткову схему (схему Гретца) двопівперіодного випрямлення та осцилограми потенціалів характерних її точок зображено на рис.7, а схему та осцилограми для двопівперіодної схеми з виведеною середньою точкою трансформатора – на рис.8. [1]

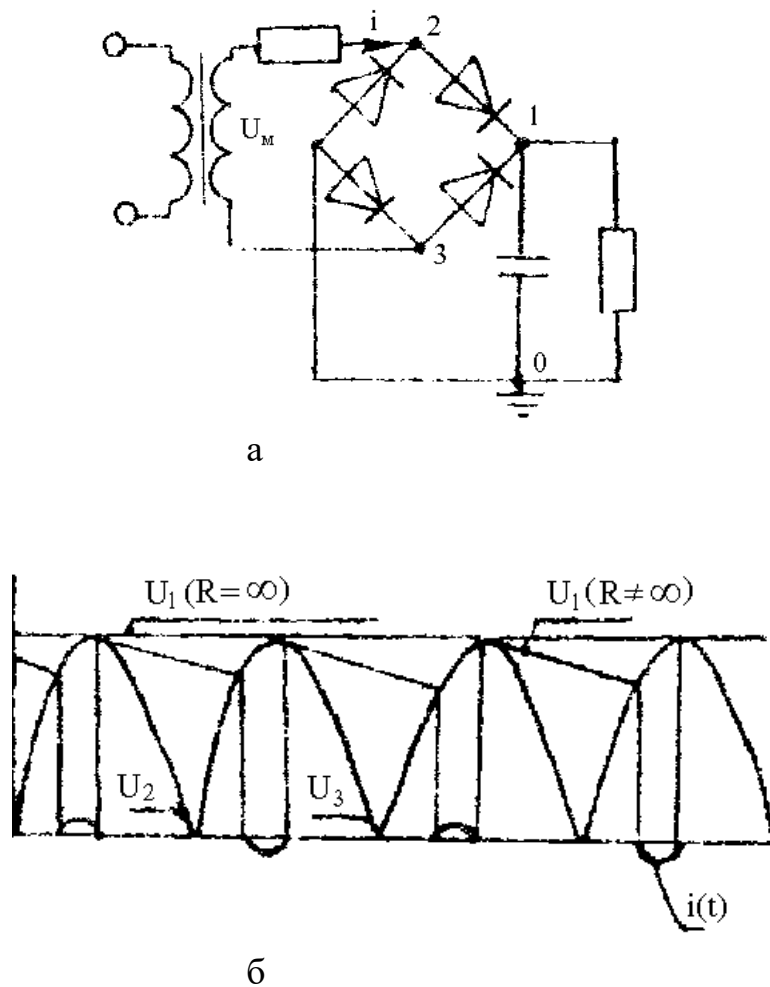
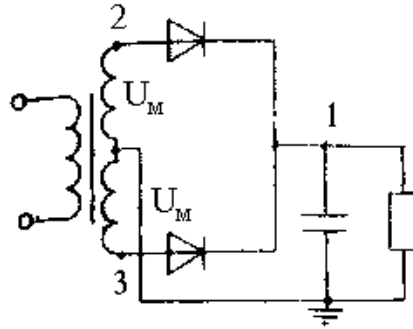
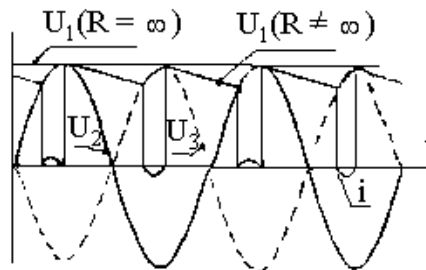


Рисунок 7 – Місткова схема двопівперіодного випрямлення (а) та осцилограми потенціалів вузлових точок (б) [1]



a



б

Рисунок 8 – Схеми двопівперіодного випрямляча із заземленою середньою точкою вторинної обмотки трансформатора (а) та осцилограми потенціалів вузлових точок (б) [1]

Обом схемам властиві такі переваги: подвоєна порівняно з частотою живильної мережі частота пульсації випрямленої напруги; відсутність підмагнічування сталі трансформатора постійним магнітним потоком; малий вихідний опір; по суті, однакова кількість діодів, оскільки у схемі , рис.7 вони працюють під дією напруги, що змінюється від нуля до U_M , а зворотна напруга діодів у схемі рис.8, має перевищувати $2U_M$. [1]

За рівності напруг U_M обмотка ВН трансформатора рис.8 містить подвоєну кількість витків порівняно з кількістю витків обмотки ВН трансформатора рис.7, але вона виконана проводом меншого перерізу. [1]

Недолік схеми зображеної на (рис.7) може бути у тому, що вона може бути не скомпонована з трансформатором типу ИОМ.

Така схема напруги, що зображена на (рис 9) – називається Двотактною, і дає можливість отримувати симетричну напругу $\pm U_M$ відносно точки заземлення.

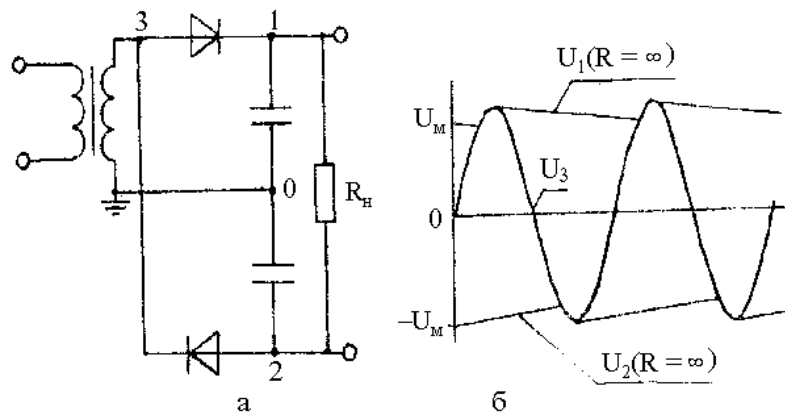


Рисунок 9 – Двотактна схема подвоєння напруги (а) та осцилограми потенціалів вузлових точок (б) [1]

Підзаряд конденсаторів, увімкнених у схему, відбувається у різні півперіоди живильної мережі. Як впливає з осцилограми, показаної на рис. 11.9б, у режимі холостого ходу зворотна напруга, прикладена до запертих діодів, дорівнює $2U_m$. Конденсатори заряджаються до напруги U_m . Підмагнічування сталі магнітопроводу постійним магнітним потоком відсутнє. [1]

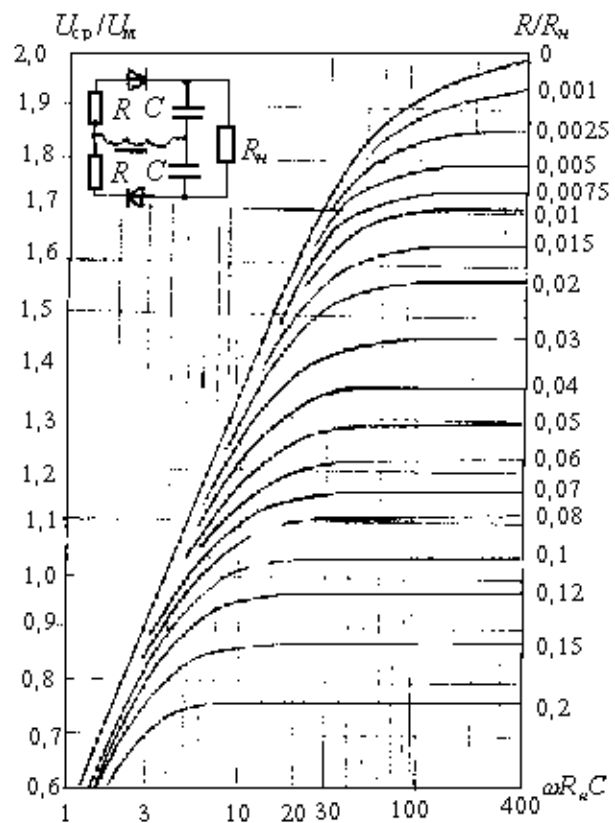


Рисунок 10 – До визначення внутрішнього падіння напруги у схемі, яка показана на рис.9 [1]

Якщо заземлення із точки 0 схеми перенести в точку 2, головна ізоляція точки 3 (краю обмотки трансформатора) опиниться під дією напруги, пульсуючої від нуля до $2U_m$, що неприпустимо. [1]

Якщо до попередньо зарядженого до напруги U_m конденсатора підімкнути паралельно незаряджений конденсатор такої самої ємності,

обидва вони будуть під напругою $0,5U_M$. Якщо після цього розірвати зв'язок між конденсаторами, знов зарядити один з них до напруги U_M і з'єднати паралельно і зустрічно, то результуюча напруга

$$U = (C_1 U_M + 0,5 C_2 U_M) / (C_1 + C_2).$$

(1)

За рівності ємностей вона становить $0,75U_M$. Повторюючи подібні операції, вдасться зарядити раніше незаряджений конденсатор до напруги U_M .

Подібні явища спостерігаються у схемі подвоєння напруги Грейнахера – Латура (рис.11), яка дає можливість під час паралельного і зустрічного з'єднань конденсаторів додатково підзаряджати кожний з них від живильного трансформатора до напруги $0,5U_M$.

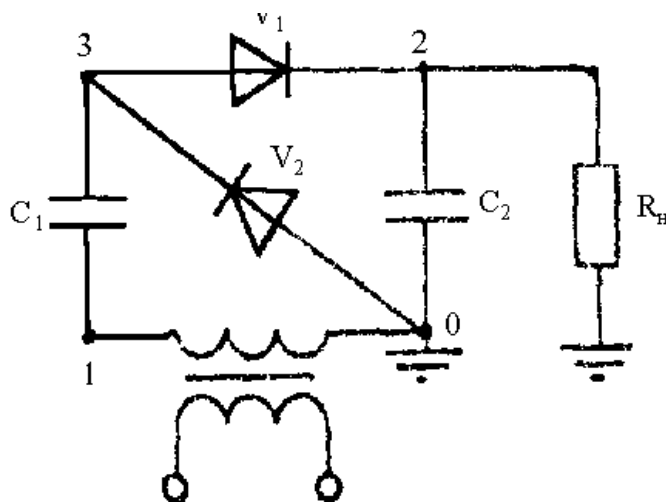


Рисунок 11 – Схема подвоєння напруги Грейнахера-Латура [1]

Припустимо, що зарядження конденсаторів схеми почалося у момент t_1 , який відповідає початкові зростання потенціалу в точці 1 (рис.12). [1]

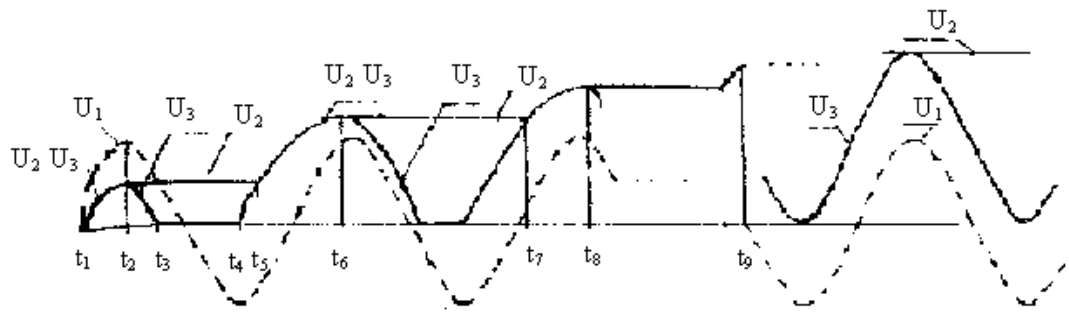


Рисунок 12 – Осцилограми потенціалів вузлових точок під час вмикання схеми (рис.11)
[1]

Відпирається діод V_1 , і до моменту t_2 конденсатори рівної ємності $C_1=C_2=C$ зарядяться до напруги $0,5U_M$. У момент t_2 , що відповідає амплітудному значенню потенціалу у точці 1, діод V_1 запирається, оскільки за наступного зниження потенціалів у точках 1 і 3 потенціал анода діода V_1 стає меншим за потенціал катода. Конденсатор C_2 , зберігаючи надобутий заряд, залишається під напругою $+0,5U_M$. Потенціал точки 3 знижується за збереження різниці потенціалів на обкладках конденсатора C_1 : $U_3 - U_1 = 0,5U_M$. У момент t_3 потенціал точки 3 стає нулевим, відпирається діод V_2 і починається перезарядження конденсатора C_1 до моменту t_4 , коли напруга на конденсаторі C_1 , що дорівнює $(U_3 - U_1)$, стає рівною U_M . В інтервалі $t_1 - t_5$ обидва діоди заперті. Зростають потенціали точок 1 і 3 за збереження різниці потенціалів: $U_3 - U_1 = U_M$. У момент t_5 відпирається діод V_1 і залишається відпертим до моменту t_6 , поки потенціал його анода вищий за потенціал катода. У момент t_6 конденсатор C_1 підзарядить конденсатор C_2 згідно з (1) до напруги $3/4 U_M$, а трансформатор додатково підвищить потенціали точок 1 і 3 ще на $0,5U_M$. Запирається діод V_1 , і конденсатор C_2 до моменту t_1 залишається зарядженим до напруги $0,75U_M + 0,5U_M = 1,25U_M$.

Аналогічно неважко довести, що в момент t_8 потенціал точки 2 досягне значення $13/8U_M$, у момент t_9 – значення $29/16U_M$. Так, під час переходу від

одного періоду до іншого напруга конденсатора C_2 наближається до значення $2U_M$, а час відпертого стану діодів у режимі холостого ходу роботи схеми прямує до нуля. При цьому потенціал точки 3 пульсує від нуля до $2U_M$, конденсатор C_1 заряджається до напруги U_M , а конденсатор C_2 – до напруги $2U_M$. Зворотна напруга діодів має перевищувати $2U_M$. Для зміни полярності вихідної напруги слід перемкнути діоди.

Під час роботи на активне навантаження напруга U_{cp} на виході схеми нижча за напругу холостого ходу U_2 на значення внутрішнього падіння напруги ΔU_m (рис.13), і пульсує з амплітудою δU_m .

Середня напруга

$$U_{cp} = 2U_M - (\Delta U_{min} + \delta U). \quad (2)$$

У час t_1 через відпертий діод V_1 , трансформатор і конденсатор C_1 передається заряд Q_1 , частина якого Q_2 поступає до конденсатора C_2 , у результаті чого потенціал точки 2 зростає на $2\delta U$, а друга частина заряду ΔQ передається навантаженню. У час t_2 обидва діоди заперті, конденсатор C_2 віддає навантаженню раніше набутий заряд Q_2 , і напруга U_2 знижується на δU .

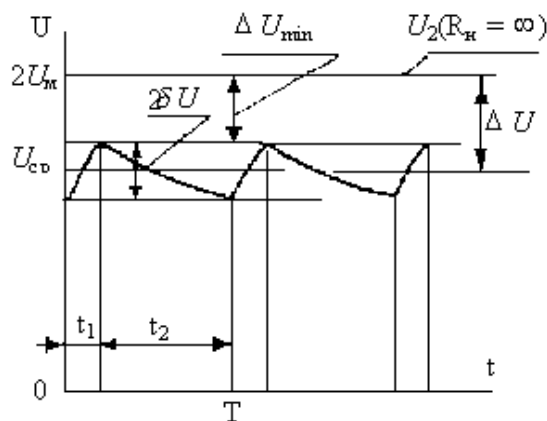


Рисунок 13 – Осцилограма вихідної напруги у схемі, рис.11 [1]

Таким чином протягом одного періоду коливальних в мережі живлення $T=1/f$ по опору навантаження буде протікати струм $I_{cp}=Q_1f$, А, і збільшиться вдвічі амплітуда пульсації напруги на виході схеми:

$$2\delta U = Q_2 / C_2.$$

Під час переходу від одного періоду до іншого у конденсаторах схеми не відбувається монотонного накопичення або зниження заряду. Отже, переданий конденсатором C_1 у час t_1 заряд Q_1 повертається до нього від мережі (трансформатора) під час відпертого стану діода V_2 . Проте коли конденсатор C_1 віддає заряд Q_1 , напруга на ньому знижується до $\Delta U_{\min} = Q_1 / C_1 = I_{cp} / f C_1$

Згідно з рис.13

$$\Delta U = (I_{cp} / f C_1) + (Q_2 / 2 C_2).$$

Середнє значення внутрішнього падіння напруги ΔU за умови нехтування зарядом ΔQ і рівності ємностей $C_1 = C_2 = C$ становитиме:

$$\Delta U = 1,5 I_{cp} / f C,$$

(3)

а амплітуда пульсації вихідної напруги

$$\delta U = I_{cp} / 2f C.$$

Перевагою схеми, яку показано на рис.11, полягає у можливості одночасного заземлення однієї точки обмотки ВН трансформатора та однієї точки випробовуваного об'єкта. [1]

Недоліки схеми – більший вихідний опір, ніж у схемі рис.9, потреба вибору конденсатора C_2 на напругу $2U_m$, пульсація вихідної напруги не з подвоєною частотою мережі, а з частотою мережі. [1]

Розділ 2

ОСНОВНА ЧАСТИНА

Вступ. Різноманіття застосувань високих напруг для сталих режимів технологічних установок (електрофільтри вугільних електростанцій, пристрої електрозабарвлення і напилення покриттів, електросепаратори) обумовлює необхідність вдосконалення їх джерел електроживлення до рівня 100 ... 200 кВ. У зв'язку з цим останнім часом виникає інтерес [2, 3] до різних варіантів удосконалення класичного генератора постійної напруги Кокрофта-Уолтона [3] з кількістю каскадів три і більше. У той же час, з огляду на досягнення високої якості високовольтних діодів [5] для отримання зазначеного вище рівня напруги більш ефективно використовувати генератор Кокрофта-Уолтона за все лише з подвоєнням випрямленої напруги, а для зниження рівня пульсацій вихідної напруги - доповнювати його "вбудованим" R, C - фільтром [6].

Слід зазначити, що до теперішнього часу сувора математична модель генератора Кокрофта-Уолтона не створена. Наявні публікації по ній дають різні результати щодо величини пульсацій напруги, відсутні аналітичні вирази для форми пульсацій та ін.

У зв'язку з цим є новою розробка авторського колективу [7-9] по створенню елементів теорії напружень і струмів генератора Кокрофта-Уолтона з подвоєнням напруги, спільно з доповнюючим його R, C - фільтром і, крім того, з можливістю введення в його навантаження нелінійних елементів типу стабілітронів.

Предмет дослідження - спеціалізований високовольтний однофазний випрямляч з подвоєнням напруги по узагальненій схемі, показаної на рис. 1.

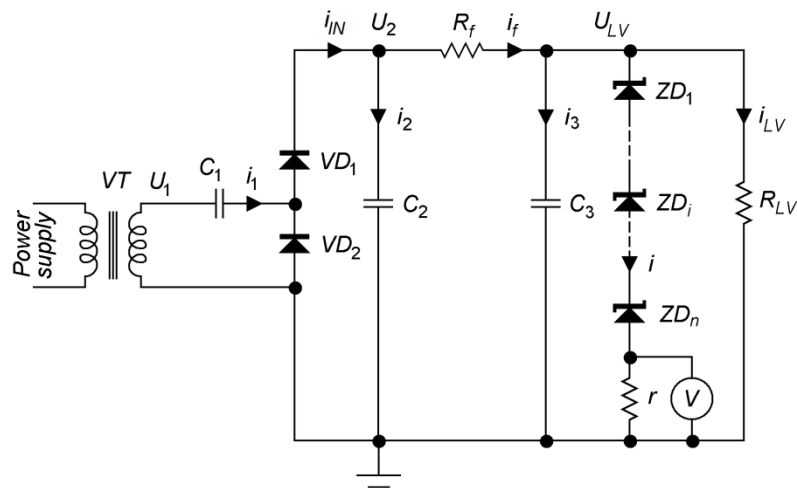


Рис. 14 Функціональна схема випрямляча з подвоєнням напруги [6]

На рис. 1: VT - високовольтний трансформатор, що підвищує; VD1, VD2 - високовольтні діоди; C1, C2, C3 - конденсатори; Rf, RLv, r - резистори. Гілка n стабилитронів ZD1, ... ZDn, резистора r і вольтметра V утворює "вбудовану" високоточну вимірювальну групу напруги навантаження ULV.

При цьому джерело напруги за схемою рис. 1 набуває інтерес як для технологічних застосувань, так і для вимірювальних установок [10, 11]. Його особливістю є те, що зміною параметрів елементів можна в широкому діапазоні регулювати амплітуду і форму пульсацій вихідної напруги ULV. У сучасних публікаціях розглядаються питання синтезу ланцюгів з ємнісними накопичувачами енергії, в тому числі, з використанням нелінійних електричних навантажень [12-14]. Однак особливості джерела високої напруги за схемою рис. 1 в відомих публікаціях інших авторів не досліджувалися. Розрахункові співвідношення для напружень і струмів схеми рис. 1 були вперше отримані в роботах [7-9].

Вихідні передумови дослідження ґрунтуються на ряді умов:

- типова вольт-амперна характеристика стабілітрона має вигляд, представлений на рис. 2, де u_0 , I_0 позначають обрану точку його робочого режиму;
- диференційний опір стабілітрона $r_d = du_{ZD} / di_{ZD}$ в його робочій області багато менше повного опору u_0 / I_0 (цифрою 1 позначена лінеаризована

вольт-амперна характеристика стабілітрона);

- ємнісний струм стабілітрона багато менше його наскрізного струму I_0 (CZD

- міжелектродному ємність стабілітрона);

- виконання стабілітронів в металевому корпусі (рис. 3) повністю екранує його внутрішній активний елемент від впливу зовнішніх електричних полів [6].

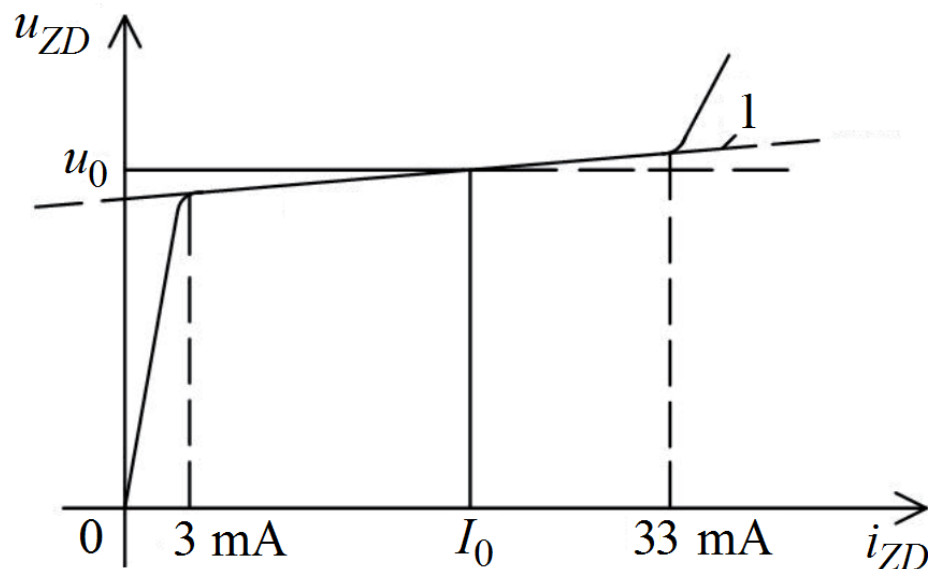


Рис. 15 Вольт-амперна характеристика стабілітрона Д818Д (Рис. 2)

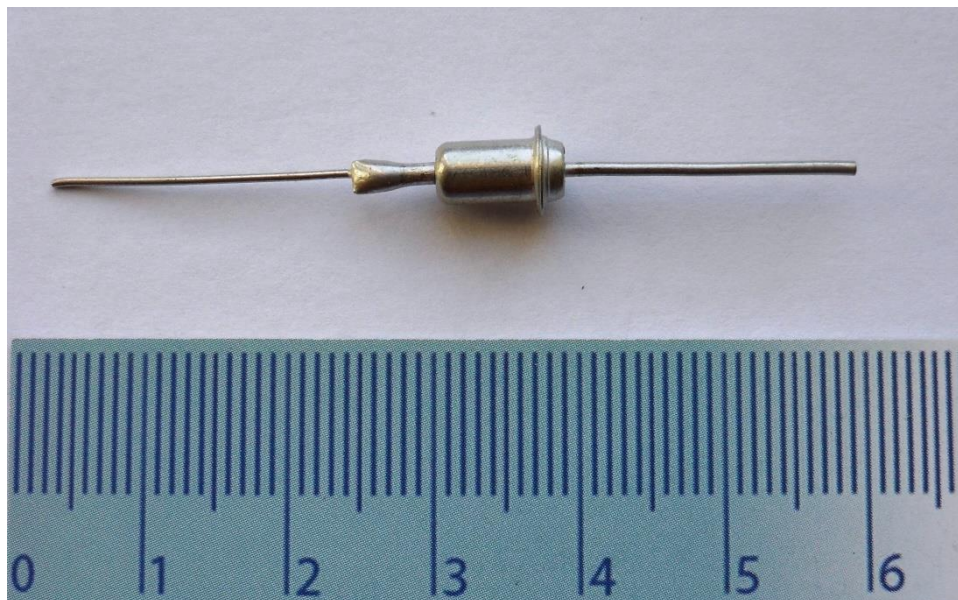


Рис. 16 Фотографія стабілітрона Д818Д (Рис. 3)

При виконанні цих умов послідовне з'єднання однотипних стабілітронів в сталому режимі характеризується протіканням по їх ланцюга

одного і того ж струму I_0 з робочою точкою напруги

$$U_0 = u_{01} + u_{02} + \dots + u_{0i} + \dots + u_{0n},$$

а також сумарним диференціальним опором

$$R_d = r_{d1} + r_{d2} + \dots + r_{di} + \dots + r_{dn},$$

що відповідає висновку [5] про допустимість послідовного з'єднання будь-якого числа стабілітронів. Типове "високовольтне" виконання ізоляційної конструкції послідовного ланцюга однотипних стабілітронів позбавляє від необхідності обліку корони і інших явищ розподілених струмів [9].

Висновок вихідних виразів. Тоді для миттєвого напруги навантаження $u_{LV}(t)$ можна записати:

$$u_{LV}(t) = U_0 + I_0 r + (i(t) - I_0)(R_d + r), \quad (1)$$

де $i(t)$ - миттєве значення струму в ланцюзі стабілітронів і резистора r . Звідси можна отримати:

$$i(t) = \frac{u_{LV}(t) - U_0 - I_0 r}{R_d + r} + I_0. \quad (2)$$

Співвідношення (1) і (2) дійсні в межах стабілізованого ділянки вольт-амперної характеристики стабілітронів (рис. 2) і, отже, можуть бути застосовані до рівня пульсацій струму $\sim 50\%$ (при виборі I_0 в середній частині цієї ділянки). Особливістю співвідношень (1) і (2) є також те, що вони можуть передбачати (при відповідному виборі параметрів U_0 , R_d) будь-які варіанти послідовного з'єднання стабілітронів і резистора r , аж до граничних: "тільки стабілітрон" навантаження або "тільки резистивної" навантаження.

Уявімо

$$1 \quad u_{LV}(t) = U_0 + I_0 r + \Delta u(t),$$

де: - пульсація напруги навантаження в часі. При цьому

$$\int_0^T \Delta u(t) dt = 0,$$

де: T - період напруги, ω - кутова частота, f - частота напруги, $T = 1 / f$ - період.

Уявімо $i_3 = C_3 \cdot du_{LV}(t) / dt$ (облік втрат в конденсаторах схеми рис. 1 незначно уточнює одержувані результати [7]) і $i_{LV} = u_{LV}(t) / R_{LV}$.

Тоді струм, що протікає через резистор R_f , складе:

$$i_f = I_0 + \frac{\Delta u(t)}{R_d + r} + \frac{U_0 + I_0 r + \Delta u(t)}{R_{LV}} + C_3 \frac{du_{LV}(t)}{dt},$$

а напруга:

$$u_{C2}(t) = u_{LV}(t) + i_f R_f.$$

У свою чергу, $i_2 = C_2 \cdot du_{C2}(t) / dt$ і повний струм на вході правій частині схеми

$$\begin{aligned} i_{IN} &= i_f + i_2 = \\ &= I_0 + \frac{u_0 + I_0 r}{R_{LV}} + \Delta u(t) \left(\frac{1}{R_{LV}} + \frac{1}{R_d + r} \right) + \\ &+ \frac{d\Delta u(t)}{dt} \left(C_3 + C_2 \left(1 + \frac{R_f}{R_{LV}} + \frac{R_f}{R_d + r} \right) \right) + \\ &+ C_2 C_3 R_f \frac{d^2 \Delta u(t)}{dt^2}. \end{aligned} \quad (3)$$

Оскільки процес відбувається циклічно, уявімо, що в момент часу t_1 діод VD1 "відкривається", і відбувається протікання струму $i_1 = i_{IN}$ (опором діода VD1 у відкритому стані нехтуємо). У момент часу $t_2 > t_1$ діод VD1 "Закривається" (опір діода в закритому стані приймаємо нескінченно великим). У проміжку часу $t_2 \leq t \leq T + t_1$ струм $i_{IN} = 0$. Виходячи з цього для даного проміжку часу з (3) отримуємо рівняння для функції виду:

$$\begin{aligned} \frac{d^2 \Delta u_1(t)}{dt^2} + a_1 \frac{d\Delta u_1(t)}{dt} + a_2 \Delta u_1(t) &= \\ &= - \frac{I_0 + \frac{1}{R_{LV}} (U_0 + I_0 r)}{C_2 C_3 R_f}, \end{aligned} \quad (4)$$

де:

$$\begin{aligned} a_1 &= \frac{C_3 + C_2 \left(1 + \frac{R_f}{R_{LV}} + \frac{R_f}{R_d + r} \right)}{C_2 C_3 R_f}, \\ a_2 &= \frac{\frac{1}{R_{LV}} + \frac{1}{R_d + r}}{C_2 C_3 R_f}. \end{aligned}$$

Дослідження коренів p_1, p_2 характеристичного рівняння $p^2 + a_1 p + a_2 = 0$ показує, що його дискримінант $D > 0$. Таким чином, рішення для знаходимо у вигляді:

$$\Delta u_1(t) = A_1 e^{p_1 t} + A_2 e^{p_2 t} + \Delta u_{1s}, \quad (5)$$

де: - усталене напруга.

Для промислових частот електроживлення схеми на рис. 1 можна не враховувати індуктивність її елементів. Тому, в режимі відкритого вентиля VD1 (в проміжку часу $t_1 \leq t \leq t_2$) маємо [7]:

$$i_N(t) = i_1(t),$$

$$u_{C2} = U_m \sin(\omega t) + U_m - \frac{1}{C_1} \int_{t_1}^t i_1(t) dt.$$

Після диференціювання цього виразу отримуємо:

$$\frac{du_{C2}(t)}{dt} = \omega U_m \cos(\omega t) - \frac{1}{C_1} i_1(t)$$

і, отже:

$$i_1(t) = C_1 \omega U_m \cos(\omega t) - C_1 \frac{du_{C2}(t)}{dt}. \quad (6)$$

Використовуючи вираз і виробляючи його диференціювання, а також підставляючи (6) в (3), отримаємо рівняння для функції в період часу $t_1 \leq t \leq t_2$:

$$\begin{aligned} \frac{d^2 \Delta u_2(t)}{dt^2} + b_1 \frac{d \Delta u_2(t)}{dt} + b_2 \Delta u_2(t) = \\ = \frac{C_1 \omega U_m \cos(\omega t)}{R_f C_3 (C_1 + C_2)} - \frac{I_0 + \frac{1}{R_{LV}} (U_0 + I_0 r)}{R_f C_3 (C_1 + C_2)}, \end{aligned} \quad (7)$$

де:

$$\begin{aligned} b_1 &= \frac{C_3 + (C_1 + C_2) \left(1 + \frac{R_f}{R_{LV}} + \frac{R_f}{R_d + r} \right)}{R_f C_3 (C_1 + C_2)}, \\ b_2 &= \frac{\frac{1}{R_{LV}} + \frac{1}{R_d + r}}{R_f C_3 (C_1 + C_2)}. \end{aligned}$$

Дискримінант характеристичного рівняння в цьому випадку також більше нуля, і рішення для знаходимо у вигляді:

$$\Delta u_2(t) = A_3 \sin(\omega t + \psi) + A_4 e^{p_3 t} + A_5 e^{p_4 t} + \Delta u_{2s}, \quad (8)$$

де: - усталене напруга, p_3, p_4 - коріння характеристичного рівняння $p^2 + b_1 p + b_2 = 0$. Значення A_3 і визначаються наступними виразами:

$$A_3 = \frac{C_1 \omega U_m}{R_f C_3 (C_1 + C_2) \sqrt{b_1^2 \omega^2 + (b_2 - \omega^2)^2}},$$

$$\psi = \arctan\left(\frac{b_2 - \omega^2}{b_1 \omega}\right).$$

Порівнюючи (5) і (8), знаходимо:

$$\Delta u_{1s} = \Delta u_{2s} = \Delta u_s = -\frac{I_0 + \frac{1}{R_{LV}}(U_0 + I_0 r)}{\frac{1}{R_{LV}} + \frac{1}{R_d + r}},$$

де: Δu_s - постійна складова напруги пульсації.

Використовуючи незмінність u_{C2} і u_{C3} в моменти часу t_1, t_2 , а також визначення t_1 з умови $U_m(1 + \sin(\omega t_1)) = u_{C2}(t_1)$, а моментів часу t_2 з умови $i_1(t_2) = 0$, а також вираз $\int_{t_2}^{T+t_1} \Delta u_1(t) dt + \int_{t_1}^{t_2} \Delta u_2(t) dt = 0$, отримаємо систему з семи алгебраїчних рівнянь (9) - (15) з родину невідомими: $A_1, A_2, A_3, A_4, A_5, t_1, t_2$.

$$\omega A_3 \cos(\omega \Delta t + \psi) + p_3 A_4 e^{p_3 \Delta t} + p_4 A_5 e^{p_4 \Delta t} =$$

$$= p_1 A_1 + p_2 A_2; \quad (9)$$

$$\omega A_3 \cos(\psi) + p_3 A_4 + p_4 A_5 =$$

$$= p_1 A_1 e^{p_1(T-\Delta t)} + p_2 A_2 e^{p_2(T-\Delta t)}; \quad (10)$$

$$A_3 \sin(\psi) + A_4 + A_5 = A_1 e^{p_1(T-\Delta t)} + A_2 e^{p_2(T-\Delta t)}; \quad (11)$$

$$A_3 \sin(\omega \Delta t + \psi) + A_4 e^{p_3 \Delta t} + A_5 e^{p_4 \Delta t} = A_1 + A_2; \quad (12)$$

$$\frac{A_3}{\omega} (\cos(\psi) - \cos(\omega \Delta t + \psi)) = -\Delta u_s T -$$

$$- \frac{A_1}{p_1} (e^{p_1(T-\Delta t)} - 1) - \frac{A_2}{p_2} (e^{p_2(T-\Delta t)} - 1) -$$

$$- \frac{A_4}{p_3} (e^{p_3 \Delta t} - 1) - \frac{A_5}{p_4} (e^{p_4 \Delta t} - 1); \quad (13)$$

$$t_1 = \frac{1}{\omega} \arcsin\left(\frac{F_1}{U_m} - 1\right); \quad (14)$$

$$t_2 = \frac{1}{\omega} \arccos\left(\frac{F_2}{\omega U_m}\right). \quad (15)$$

В (14) F_1 визначається виразом:

$$\begin{aligned} F_1 = & I_0 R_f + (U_0 + I_0 r) \left(1 + \frac{R_f}{R_{LV}}\right) + \\ & + (\Delta u_s + A_3 \sin(\psi) + A_4 + A_5) \left(1 + \frac{R_f}{R_{LV}} + \frac{R_f}{R_d + r}\right) + \\ & + C_3 R_f (\omega A_3 \cos(\psi) + p_3 A_4 + p_4 A_5). \end{aligned}$$

У свою чергу, в (15) F_2 визначається виразом:

$$\begin{aligned} F_2 = & C_3 R_f \left(-\omega^2 A_3 \sin(\omega \Delta t + \psi) + p_3^2 A_4 e^{p_3 \Delta t} + \right. \\ & + p_4^2 A_5 e^{p_4 \Delta t} \left. \right) + \left(1 + \frac{R_f}{R_{LV}} + \frac{R_f}{R_d + r}\right) (\omega A_3 \cos(\omega \Delta t + \psi) + \\ & + p_3 A_4 e^{p_3 \Delta t} + p_4 A_5 e^{p_4 \Delta t}). \end{aligned}$$

Також відзначимо, що $\Delta t = t_2 - t_1$, а зв'язок A_3 з U_m визначена вище.

Рівняння (9) - (13) є лінійними по відношенню до $A_1, \dots, A_j, \dots, A_5$, в зв'язку з чим система рівнянь (9) - (15) може бути приведена до трьох рівнянь з трьома невідомими t_1, t_2, A_j . Наш досвід проведення розрахунків за (9) - (15) підтверджує можливість отримання в кожному конкретному випадку однозначної відповіді системи в безлічі дійсних чисел.

Розвиток теорії. Отримані вище вихідні вирази (1) - (15) наведені з публікацій авторського колективу [7-9] і необхідні для подальшого викладу матеріалів даної статті.

Перевага отриманого аналітичного рішення даної задачі передбачає його логічне завершення у висновку виразів для потужності елементів схеми рис.1 з урахуванням пульсацій напруги і струмів в них (без допущення обмеження їх малості).

Втрати потужності в навантаженні RLV можуть бути знайдені в такий спосіб:

$$P_{LV} = f \int_{t_2}^{T+t_1} \frac{[u_{LV}(t)]^2}{R_{LV}} dt + f \int_{t_1}^{t_2} \frac{[u_{LV}(t)]^2}{R_{LV}} dt, \quad (16)$$

де: $u_{LV}(t) = U_0 + I_0 r + \Delta u_1(t)$ для проміжку часу $t_2 \leq t \leq T + t_1$, і $u_{LV}(t) = U_0 + I_0 r + \Delta u_2(t)$ для проміжку часу $t_1 \leq t \leq t_2$.

Тоді перетворимо (16) до наступного вигляду:

$$\begin{aligned} \frac{R_{LV} P_{LV}}{f} &= \left(\frac{R_{LV} P_{LV}}{f} \right)^{(1)} + \left(\frac{R_{LV} P_{LV}}{f} \right)^{(2)} = \\ &= \int_{t_2}^{T+t_1} [V_0 + \Delta u_1(t)]^2 dt + \int_{t_1}^{t_2} [V_0 + \Delta u_2(t)]^2 dt, \quad (17) \end{aligned}$$

Де $V_0 = U_0 + I_0 r$.

Перепишемо формулу (17), інтегруючи кожен компонент і уявляючи

$V_0^{(1)} = V_0 + \Delta u_s$, отримаємо такі вирази, які дозволяють розраховувати втрати потужності PLV з урахуванням пульсацій напруги і струму в навантаженні RLV:

$$\begin{aligned} \left(\frac{R_{LV} P_{LV}}{f} \right)^{(1)} &= \left(V_0^{(1)} \right)^2 (T + t_1 - t_2) + \frac{A_1^2}{2p_1} \times \\ &\times \left[e^{2p_1(T+t_1-t_2)} - 1 \right] + \frac{A_2^2}{2p_2} \left[e^{2p_2(T+t_1-t_2)} - 1 \right] + \\ &+ \frac{2V_0^{(1)} A_1}{p_1} \left[e^{p_1(T+t_1-t_2)} - 1 \right] + \frac{2V_0^{(1)} A_2}{p_2} \times \\ &\times \left[e^{p_2(T+t_1-t_2)} - 1 \right] + \frac{2A_1 A_2}{p_1 + p_2} \left[e^{(p_1+p_2)(T+t_1-t_2)} - 1 \right]. \quad (18) \\ \left(\frac{R_{LV} P_{LV}}{f} \right)^{(2)} &= \left(V_0^{(1)} \right)^2 (t_2 - t_1) + A_3^2 \times \\ &\times \left[\frac{t_2 - t_1}{2} + \frac{1}{4\omega} [\sin(2\psi) - \sin(\omega(t_2 - t_1) + \psi)] \right] + \\ &+ \frac{A_4^2}{2p_3} \left[e^{2p_3(t_2-t_1)} - 1 \right] + \frac{A_5^2}{2p_4} \left[e^{2p_4(t_2-t_1)} - 1 \right] + \\ &+ \frac{2V_0^{(1)} A_3}{\omega} [\cos(\psi) - \cos(\omega(t_2 - t_1) + \psi)] + \frac{2V_0^{(1)} A_4}{p_3} \times \\ &\times \left[e^{p_3(t_2-t_1)} - 1 \right] + \frac{2V_0^{(1)} A_5}{p_4} \left[e^{p_4(t_2-t_1)} - 1 \right] + \\ &+ \frac{2A_3 A_4}{\omega \left[\left(\frac{p_3}{\omega} \right)^2 + 1 \right]} \left[e^{p_3(t_2-t_1)} \left(\frac{p_3}{\omega} \sin[\omega(t_2 - t_1) + \psi] - \right. \right. \\ &\left. \left. - \cos[\omega(t_2 - t_1) + \psi] \right) - \frac{p_3}{\omega} \sin(\psi) + \cos(\psi) \right] + \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& + \frac{2A_3A_5}{\omega \left[\left(\frac{p_4}{\omega} \right)^2 + 1 \right]} \left[e^{p_4(t_2 - t_1)} \times \right. \\
& \times \left(\frac{p_4}{\omega} \sin[\omega(t_2 - t_1) + \psi] - \cos[\omega(t_2 - t_1) + \psi] \right) - \\
& \left. - \frac{p_4}{\omega} \sin(\psi) + \cos(\psi) \right] + \frac{2A_4A_5}{p_3 + p_4} \left[e^{(p_3 + p_4)(t_2 - t_1)} - 1 \right]. \quad (19)
\end{aligned}$$

Вираз для потужності втрат електроенергії в групі елементів ZD1 ... ZDn, r з урахуванням попереднього розгляду буде мати вигляд:

$$\begin{aligned}
P_i = f \int_{t_2}^{T+t_1} & \left[V_0 + \Delta u_1(t) \right] \cdot \left[\frac{\Delta u_1(t)}{R_d + r} + I_0 \right] dt + \\
& + f \int_{t_1}^{t_2} \left[V_0 + \Delta u_2(t) \right] \cdot \left[\frac{\Delta u_2(t)}{R_d + r} + I_0 \right] dt. \quad (20)
\end{aligned}$$

Далі перетворимо вираз (20) до форми:

$$\begin{aligned}
\frac{P_i}{f} &= \left(\frac{P_i}{f} \right)^{(1)} + \left(\frac{P_i}{f} \right)^{(2)} = \\
&= \int_{t_2}^{T+t_1} \left[V_0 I_0 + \Delta u_1(t) \left(I_0 + \frac{V_0}{R_d + r} \right) + \frac{(\Delta u_1(t))^2}{R_d + r} \right] dt + \\
&+ \int_{t_1}^{t_2} \left[V_0 I_0 + \Delta u_2(t) \left(I_0 + \frac{V_0}{R_d + r} \right) + \frac{(\Delta u_2(t))^2}{R_d + r} \right] dt. \quad (21)
\end{aligned}$$

Після інтегрування кожного компонента можна отримати наступні вирази, які дозволяють розраховувати втрати потужності в групі елементів ZD1 ... ZDn, r:

$$\begin{aligned}
\left(\frac{P_i}{f} \right)^{(1)} &= V_0 I_0 (T + t_1 - t_2) + \frac{I_0^{(1)} A_1}{p_1} \left[e^{p_1(T+t_1-t_2)} - 1 \right] + \\
&+ \frac{I_0^{(1)} A_2}{p_2} \left[e^{p_2(T+t_1-t_2)} - 1 \right] + I_0^{(1)} \Delta u_s (T + t_1 - t_2) + \\
&+ \frac{V_0^{(2)} A_1^2}{2p_1} \left[e^{2p_1(T+t_1-t_2)} - 1 \right] + \frac{V_0^{(2)} A_2^2}{2p_2} \times \left[e^{2p_2(T+t_1-t_2)} - 1 \right] + V_0^{(2)} (\Delta u_s)^2 (T + t_1 - t_2) + \\
&+ \frac{2V_0^{(2)} A_1 A_2}{p_1 + p_2} \cdot \left[e^{(p_1 + p_2)(T+t_1-t_2)} - 1 \right] + \frac{2V_0^{(2)} \Delta u_s A_1}{p_1} \times \\
&\times \left[e^{p_1(T+t_1-t_2)} - 1 \right] + \frac{2V_0^{(2)} \Delta u_s A_2}{p_2} \left[e^{p_2(T+t_1-t_2)} - 1 \right], \quad (22)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\left(\frac{P_i}{f}\right)^{(2)} &= V_0 I_0 (t_2 - t_1) + \frac{I_0^{(1)} A_3}{\omega} [\cos(\psi) - \\
&- \cos[\omega(t_2 - t_1) + \psi]] + \frac{I_0^{(1)} A_4}{p_3} [e^{p_3(t_2 - t_1)} - 1] + \\
&+ \frac{I_0^{(1)} A_5}{p_4} [e^{p_4(t_2 - t_1)} - 1] + I_0^{(1)} \Delta u_s (t_2 - t_1) + V_0^{(2)} A_3^2 \times \\
&\times \left[\frac{1}{2} (t_2 - t_1) + \frac{1}{4\omega} [\sin(2\psi) - \sin(2(\omega(t_2 - t_1) + \psi))] \right] + \\
&+ \frac{V_0^{(2)} A_4^2}{2p_3} [e^{2p_3(t_2 - t_1)} - 1] + \frac{V_0^{(2)} A_5^2}{2p_4} [e^{2p_4(t_2 - t_1)} - 1] + \\
&+ V_0^{(2)} (\Delta u_s)^2 (t_2 - t_1) + \frac{2V_0^{(2)} A_3 A_4}{\omega \left[\left(\frac{p_3}{\omega} \right)^2 + 1 \right]} [e^{p_3(t_2 - t_1)} \times \\
&\times \left(\frac{p_3}{\omega} \sin[\omega(t_2 - t_1) + \psi] - \cos[\omega(t_2 - t_1) + \psi] \right) - \\
&- \frac{p_3}{\omega} \sin(\psi) + \cos(\psi)] + \frac{2V_0^{(2)} A_3 A_5}{\omega \left[\left(\frac{p_4}{\omega} \right)^2 + 1 \right]} [e^{p_4(t_2 - t_1)} \times \\
&\times \left(\frac{p_4}{\omega} \sin[\omega(t_2 - t_1) + \psi] - \cos[\omega(t_2 - t_1) + \psi] \right) - \\
&- \frac{p_4}{\omega} \sin(\psi) + \cos(\psi)] + \frac{2V_0^{(2)} \Delta u_s A_3}{\omega} [\cos(\psi) - \\
&- \cos[\omega(t_2 - t_1) + \psi]] + \frac{2V_0^{(2)} A_4 A_5}{p_3 + p_4} [e^{(p_3 + p_4)(t_2 - t_1)} - 1] + \\
&+ \frac{2V_0^{(2)} \Delta u_s A_4}{p_3} [e^{p_3(t_2 - t_1)} - 1] + \\
&+ \frac{2V_0^{(2)} \Delta u_s A_5}{p_4} [e^{p_4(t_2 - t_1)} - 1], \quad (23)
\end{aligned}$$

де: $I_0^{(1)} = I_0 + V_0 / (R_d + r)$, $V_0^{(2)} = 1 / (R_d + r)$.

Потужність втрат електроенергії в активному опорі фільтра Rf може бути визначена за формулою:

$$P_f = f \int_{t_2}^{T+t_1} [(i_{f1})^2 R_f] dt + f \int_{t_1}^{t_2} [(i_{f2})^2 R_f] dt, \quad (24)$$

де величини i_{f1} , i_{f2} мають такий вигляд:

$$i_{f1} = I_0 + \frac{U_0 + I_0 r}{R_{LV}} + \Delta u_1(t) \left(\frac{1}{R_{LV}} + \frac{1}{R_d + r} \right) +$$

$$\begin{aligned}
& + C_3 \frac{d\Delta u_1(t)}{dt}, \\
i_{f2} = & I_0 + \frac{U_0 + I_0 r}{R_{LV}} + \Delta u_2(t) \left(\frac{1}{R_{LV}} + \frac{1}{R_d + r} \right) + \\
& + C_3 \frac{d\Delta u_2(t)}{dt}.
\end{aligned}$$

Тоді перетворимо вираз (24) до вигляду:

$$\begin{aligned}
\frac{P_f}{R_f f} = & \left(\frac{P_f}{R_f f} \right)^{(1)} + \left(\frac{P_f}{R_f f} \right)^{(2)} = \\
= & \int_{t_2}^{T+t_1} \left(I_0^{(2)} + \Delta u_1(t) \left(\frac{1}{R_{LV}} + \frac{1}{R_d + r} \right) + C_3 \frac{d\Delta u_1(t)}{dt} \right)^2 dt + \\
& + \int_{t_1}^{t_2} \left(I_0^{(2)} + u_2(t) \left(\frac{1}{R_{LV}} + \frac{1}{R_d + r} \right) + C_3 \frac{d\Delta u_2(t)}{dt} \right)^2 dt,
\end{aligned}$$

де: $I_0^{(2)} = I_0 + (U_0 + I_0 r)/R_{LV}$.

Після інтегрування кожного компонента можемо отримати такі вирази, які дозволяють розраховувати втрати потужності в активному опорі фільтра установки:

$$\begin{aligned}
\left(\frac{P_3}{R_f f} \right)^{(1)} = & \left(I_0^{(3)} \right)^2 (T + t_1 - t_2) + \frac{X_4^2}{2p_1} \left[e^{2p_1(T+t_1-t_2)} - 1 \right] + \\
& + \frac{X_5^2}{2p_2} \left[e^{2p_2(T+t_1-t_2)} - 1 \right] + \frac{2I_0^{(3)}X_4}{p_1} \left[e^{p_1(T+t_1-t_2)} - 1 \right] + \\
& + \frac{2I_0^{(3)}X_5}{p_2} \left[e^{p_2(T+t_1-t_2)} - 1 \right] + \frac{2X_4X_5}{p_1 + p_2} \times \\
& \times \left[e^{(p_1+p_2)(T+t_1-t_2)} - 1 \right], \quad (25)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\left(\frac{P_f}{R_f f} \right)^{(2)} = & \left(I_0^{(3)} \right)^2 (t_2 - t_1) + X_1^2 \left[\frac{1}{2} (t_2 - t_1) + \right. \\
& \left. + \frac{1}{4\omega} [\sin(2\psi) - \sin 2[\omega(t_2 - t_1) + \psi]] \right] + (A_3 \omega C_3)^2 \times
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& \times \left[\frac{1}{2} (t_2 - t_1) + \frac{1}{4\omega} [\sin(2[\omega(t_2 - t_1) + \psi]) - \sin(2\psi)] \right] + \frac{X_2^2}{2p_3} \left[e^{2p_3(t_2-t_1)} - 1 \right] + \frac{X_3^2}{2p_4} \left[e^{2p_4(t_2-t_1)} - 1 \right] + \\
& + \frac{2I_0^{(3)}X_1}{\omega} [\cos(\psi) - \cos[\omega(t_2 - t_1) + \psi]] +
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& + 2I_0^{(3)} A_3 C_3 [\sin[\omega(t_2 - t_1) + \psi] - \sin(\psi)] + \frac{2I_0^{(3)} X_2}{p_3} \times \times [e^{p_3(t_2 - t_1)} - 1] + \frac{2I_0^{(3)} X_3}{p_4} [e^{p_4(t_2 - t_1)} - 1] + \frac{X_1 A_3 C_3}{2} \times \\
& \times [\cos(2\psi) - \cos(2[\omega(t_2 - t_1) + \psi])] + + \frac{2X_1 X_2}{\omega \left[\left(\frac{p_3}{\omega} \right)^2 + 1 \right]} \left[e^{p_3(t_2 - t_1)} \times \times \left(\frac{p_3}{\omega} \sin[\omega(t_2 - t_1) + \psi] - \cos[\omega(t_2 - t_1) + \psi] \right) - \right. \\
& \left. - \frac{p_3}{\omega} \sin(\psi) + \cos(\psi) \right] + \frac{2X_1 X_3}{\omega \left[\left(\frac{p_4}{\omega} \right)^2 + 1 \right]} \left[e^{p_4(t_2 - t_1)} \times \right. \\
& \times \left(\frac{p_4}{\omega} \cdot \sin[\omega \cdot (t_2 - t_1) + \psi] - \cos[\omega \cdot (t_2 - t_1) + \psi] \right) - \frac{p_4}{\omega} \cdot \sin \psi + \cos \psi \left. \right] + \frac{2X_2 A_3 C_3}{\left(\frac{p_3}{\omega} \right)^2 + 1} \left[e^{p_3 \cdot (t_2 - t_1)} \times \right. \\
& \times \left(\frac{p_3}{\omega} \cdot \cos[\omega \cdot (t_2 - t_1) + \psi] + \sin[\omega \cdot (t_2 - t_1) + \psi] \right) - \\
& \left. - \frac{p_3}{\omega} \cos(\psi) - \sin(\psi) \right] + \frac{2X_3 A_3 C_3}{\left(\frac{p_4}{\omega} \right)^2 + 1} \left[e^{p_4(t_2 - t_1)} \times \right. \\
& \times \left(\frac{p_4}{\omega} \cos[\omega(t_2 - t_1) + \psi] + \sin[\omega(t_2 - t_1) + \psi] \right) - \\
& \left. - \frac{p_4}{\omega} \cos(\psi) - \sin(\psi) \right] + \frac{2X_2 X_3}{p_3 + p_4} \times \\
& \times \left[e^{(p_3 + p_4)(t_2 - t_1)} - 1 \right], \quad (26)
\end{aligned}$$

де:

$$I_0^{(3)} = I_0^{(2)} + \Delta u_s \left(\frac{1}{R_{LV}} + \frac{1}{R_d + r} \right);$$

$$X_1 = A_3 \left(\frac{1}{R_{LV}} + \frac{1}{R_d + r} \right);$$

$$X_2 = A_4 \left(p_3 C_3 + \frac{1}{R_{LV}} + \frac{1}{R_d + r} \right);$$

$$X_3 = A_5 \left(p_4 C_3 + \frac{1}{R_{LV}} + \frac{1}{R_d + r} \right);$$

$$X_4 = A_1 \left(p_1 C_3 + \frac{1}{R_{LV}} + \frac{1}{R_d + r} \right);$$

$$X_5 = A_2 \left(p_2 C_3 + \frac{1}{R_{LV}} + \frac{1}{R_d + r} \right).$$

Апробація отриманих теоретичних результатів була проведена з використанням розрахунків параметрів установки еталона ДЕТУ 08-04-99,

який використовується в державній повірочній схемою для засобів вимірювань електричної напруги постійного струму в діапазоні 1 ... 180 кВ [14].

Показаної на рис. 1 схемою живлення високої напруги постійного струму були присвоєні параметри, які відповідають установці ДЕТУ 08-04-99 в режимах номінальних напруг V_0 від 1 до 180 кВ: C_1 - зарядний конденсатор (0,1 мкФ); C_2 , C_3 - фільтрові конденсатори (0,072 мкФ); R_f - опір фільтра (1,78 МОм); $ZD_1, \dots ZD_i, \dots ZD_n$ - стабілітрони типу Д818Д; RLV - опір омічного подільника напруги.

Для стабілітронів Д818Д зроблений вибір стабілізованого струму установки $I_0 = 5$ мА для 27 значень номінальних напруг на навантаженні V_0 , згідно табл. 1. Дільник напруги має чотири значення вхідних номінальних напруг V_0 : 180 кВ; 90 кВ; 60 кВ; 30 кВ, для яких струм подільника напруги дорівнює $ILV = 2,5$ мА. Для інших 23 вхідних напруг подільника напруги V_0 його струм зменшується пропорційно вхідному напрузі.

Були проведені розрахунки за рішенням системи рівнянь (9) - (15) для параметрів $r = 10$ кОм для режимів $V_0 = 1 \dots 10$ кВ і $r = 60$ кОм для режимів $V_0 = 20 \dots 180$ кВ. Значення r_d визначалося згідно [4] рівним 22 Ом для кожного стабілітрона, а $R_d = nr_d$, де n - кількість стабілітронів, відповідне кожному режиму V_0 . Це кількість визначено виходячи із середнього значення напруги стабілізації Д818Д $u_0 = 9$ В.

За результатами розрахунків визначалися максимальні позитивні значення пульсації і мінімальні негативні значення пульсації, а також коефіцієнт амплітуди пульсацій:

$$, \%. \quad (27)$$

Отримані результати розрахунків наведені в табл. 1.

У табл. 1. також наведено значення сумарного середнього струму навантаження $I_0 + ILV$ (мА) для кожного режиму установки ДЕТУ 08-04-99.

Таблиця 1

Результати розрахунків для 27
режимів харчування установки ДЕТУ 08-04-99

V0, кВ	Um, кВ	$\Delta 1$, В	$\Delta 2$, В	Δp , %	I0+ILV, мА
1	5,97	3,54	−4,08	0,381	5,083
2	6,61	3,81	−4,88	0,217	5,167
3	7,25	4,45	−5,69	0,169	5,250
4	7,89	5,04	−6,49	0,144	5,333
5	8,52	5,57	−7,27	0,128	5,417
6	9,16	6,04	−8,04	0,117	5,500
7	9,80	6,44	−8,81	0,109	5,583
8	10,44	6,78	−9,54	0,102	5,667
9	11,08	7,07	−10,26	0,096	5,750
10	11,72	7,31	−10,97	0,091	5,833
20	18,27	11,41	−20,65	0,080	6,667
30	24,66	13,09	−24,15	0,062	7,500
40	29,27	11,71	−22,07	0,042	6,667
50	35,22	12,46	−23,82	0,036	7,083
60	41,17	13,18	−25,51	0,032	7,500
70	46,09	12,18	−23,86	0,025	6,944
80	51,90	12,63	−24,97	0,023	7,222
90	57,71	13,09	−26,05	0,021	7,500
100	62,04	11,11	−22,32	0,017	6,389
110	67,70	11,39	−22,88	0,016	6,528
120	73,36	11,67	−23,43	0,015	6,667
130	79,02	11,95	−23,97	0,014	6,806
140	84,68	12,22	−24,51	0,013	6,944

150	90,34	12,49	-25,03	0,012	7,083
160	96,00	12,76	-25,55	0,012	7,222
170	101,66	13,02	-26,07	0,012	7,361
180	107,32	13,29	-26,59	0,011	7,500

З даних табл. 1 випливає, що зі збільшенням напруги навантаження V_0 коефіцієнт амплітуди пульсацій Δp відповідно зменшується. У режимі $V_0 = 1$ кВ коефіцієнт амплітуди пульсацій $\Delta p = 0,381\%$, а в режимі $V_0 = 180$ кВ коефіцієнт амплітуди пульсацій становить $\Delta p = 0,011\%$. Певні вище значення пульсацій в різних режимах роботи установки відрізняються в 35 разів.

Використовуючи отримані вище значення P_{LV} , P_i , P_f визначимо енергетичний коефіцієнт корисної дії установки ДЕТУ 08-04-99 з нелінійним навантаженням:

$$EFF = \frac{P_{LV} + P_i}{P_{LV} + P_i + P_f} 100 = \frac{1}{1 + P_f / (P_{LV} + P_i)} 100, \% \quad (28)$$

У табл. 2 наведені розрахункові значення EFF (28) для установки ДЕТУ 08-04-99 при режимах V_0 від 1 до 30 кВ. Для режиму $V_0 = 180$ кВ значення EFF установки становить 93,10%.

Отримані розрахункові результати по установці ДЕТУ 08-04-99, наведені в табл. 1 і табл. 2, підтверджуються даними її експериментальних досліджень.

Таблиця 2

Значення енергетичного коефіцієнта корисної дії установки ДЕТУ 08-04-99 зі значеннями V_0 від 1 кВ до 30 кВ

V_0 , кВ	PLV, Вт	P_i , Вт	P_f , Вт	EFF, %
1,0	0,09	5,25	46,15	10,38
2,0	0,35	10,25	47,68	18,19
3,0	0,78	15,25	49,20	24,57
4,0	1,37	20,25	50,77	29,86
5,0	2,13	25,25	52,37	34,33
6,0	3,05	30,25	53,99	38,15
7,0	4,14	35,25	55,63	41,45
8,0	5,40	40,25	57,30	44,34
9,0	6,83	45,25	59,00	46,88
10,0	8,42	50,25	60,72	49,14
20,0	34,34	101,50	79,85	62,98
30,0	76,51	151,50	100,97	69,31

Обговорення результатів. При визначенні коефіцієнта корисної дії (EFF) установки високої напруги вважаємо корисною потужність $P_{out} = PLV + P_i$, в той час як потужність P_f представляє додаткові втрати в опорі фільтра. Разом з тим, збільшення опору фільтра R_f є засобом зменшення амплітуди пульсацій напруги в навантаженні установки при збільшенні напруги U_m на вході схеми [6].

Особливістю побудови математичної моделі режимів типової установки високої напруги (рис. 1) є те, що воно визначає необхідні параметри установки в залежності від зворотного - заданого середнього значення падіння напруги на групі стабилитронов U_0 при заданому середньому

значенні струму I_0 в ній. Пропоноване рішення встановлює числове значення моменту часу t_1 - початку заряджання конденсатора C_2 установки і моментів часу t_2 - «відключення» правій частині установки від ємності C_1 , а також визначає параметри $A_1, A_2, A_3, A_4, A_5, p_1, p_2, p_3, p_4, \psi, \Delta u_s, U_m$ в залежності від значень $U_0, I_0, C_1, C_2, C_3, R_{LV}, T, r, R_d, R_f$ аналітичним методом, і є новим.

Застосування стабилитронов в вимірювальній групі установки високої напруги постійного струму дозволяє істотно знизити (до 3 і більше разів) амплітуду пульсацій і підвищити якість напруги на навантаженні [9].

Також слід зазначити, що на даний момент для моделювання схем множення напруги, а також процесів в ізоляції електрообладнання широко застосовуються професійні та демонстраційні версії різних програм схемотехнічного моделювання. Для моделювання, наприклад, явища часткових розрядів в ізоляції обладнання високої напруги досить демонстраційних версій програм [16, 17]. Однак, кількість стабілітронів в діючій установці ДЕТУ 08-04-99 становить десятки тисяч штук. У зв'язку з цим, з одного боку, повне моделювання такої схеми вимагає дорогих професійних програм схемотехнічного моделювання. З іншого боку, як показано в статті, відсутня необхідність в детальному схемотехнічному моделювання такої складної схеми

Розділ 3

АНАЛІЗ ВПЛИВУ НАВАНТАЖУВАЛЬНОЇ ЄМНОСТІ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ВИСОКОВОЛЬТНОГО ВИПРЯМЛЯЧА ВИСОКОЇ НАПРУГИ З ЛІНІЙНИМ ТА НЕЛІНІЙНИМ НАВАНТАЖЕННЯМ

Проведемо аналіз першої точки при $C=0,72$

$$\begin{aligned}
 C1 &:= 0.1 \cdot 10^{-6} & V0 &:= 3000 & r &:= 6000 & f &:= 50 & C2 &:= 0.072 \cdot 10^{-6} \\
 Ilv &:= 2.5 \cdot 10^{-3} & rd &:= 22 & Rf &:= 1.78 \cdot 10^6 & I0 &:= 0.001 & n &:= 330 & \Delta t &:= 0.0003587 \\
 Rlv &:= 12 \cdot 10^7 & T &:= \frac{1}{f} = 0.02 & U0 &:= 29700 \\
 W &:= 2\pi \cdot f = 314.159265359 \\
 Rd &:= rd \cdot n & Rd &= 72600 \\
 \Delta us &:= -\frac{I0 + \frac{1}{Rlv} \cdot (U0 + I0 \cdot r)}{\frac{1}{Rlv} + \frac{1}{Rd + r}} = -695.3816033283 \\
 a1 &:= \frac{C3 + C2 \cdot \left(1 + \frac{Rf}{Rlv} + \frac{Rf}{Rd + r}\right)}{C2 \cdot C3 \cdot Rf} & a1 &= 120.463985675 \\
 a2 &:= \frac{\frac{1}{Rlv} + \frac{1}{Rd + r}}{C2 \cdot C3 \cdot Rf} & a2 &= 818.184242683 \\
 p1 &:= -\frac{a1}{2} + \sqrt{\frac{a1^2}{4} - a2} & p1 &= -7.2253072356 \\
 p2 &:= -\frac{a1}{2} - \sqrt{\frac{a1^2}{4} - a2} & p2 &= -113.238678440 \\
 b1 &:= \frac{C3 + (C1 + C2) \cdot \left(1 + \frac{Rf}{Rlv} + \frac{Rf}{Rd + r}\right)}{Rf \cdot C3 \cdot (C1 + C2)} & b1 &= 115.9275051138 \\
 b2 &:= \frac{\frac{1}{Rlv} + \frac{1}{Rd + r}}{Rf \cdot C3 \cdot (C1 + C2)} & b2 &= 342.495729495 \\
 p3 &:= -\frac{b1}{2} + \sqrt{\frac{b1^2}{4} - b2}
 \end{aligned}$$

$$p4 := -\frac{b1}{2} - \sqrt{\frac{b1^2}{4} - b2}$$

$$p3 = -3.03378914$$

$$\psi := \operatorname{atan}\left(\frac{b2 - W^2}{b1 \cdot W}\right) = -1.2161580935$$

$$p4 = -112.8937159738$$

$$A1 := 0 \quad A2 := 0 \quad A3 := 0 \quad A4 := 0 \quad A5 := 0$$

Given

$$W \cdot A3 \cdot \cos(W \cdot \Delta t + \psi) + p3 \cdot A4 \cdot e^{p3 \cdot \Delta t} + p4 \cdot A5 \cdot e^{p4 \cdot \Delta t} = p1 \cdot A1 + p2 \cdot A2 \quad (9)$$

$$W \cdot A3 \cdot \cos(\psi) + p3 \cdot A4 + p4 \cdot A5 = p1 \cdot A1 \cdot e^{p1 \cdot (T - \Delta t)} + p2 \cdot A2 \cdot e^{p2 \cdot (T - \Delta t)} \quad (10)$$

$$A3 \cdot \sin(\psi) + A4 + A5 = A1 \cdot e^{p1 \cdot (T - \Delta t)} + A2 \cdot e^{p2 \cdot (T - \Delta t)} \quad (11)$$

$$A3 \cdot \sin(W \cdot \Delta t + \psi) + A4 \cdot e^{p3 \cdot \Delta t} + A5 \cdot e^{p4 \cdot \Delta t} = A1 + A2 \quad (12)$$

$$\frac{A3}{W} (\cos(\psi) - \cos(W \cdot \Delta t + \psi)) = -\Delta us \cdot T - \left[\frac{A1}{p1} \cdot [e^{p1 \cdot (T - \Delta t)} - 1] \right] - \left[\frac{A2}{p2} \cdot [e^{p2 \cdot (T - \Delta t)} - 1] \right] - \left[\frac{A4}{p3} \cdot (e^{p3 \cdot \Delta t} - 1) \right] - \left[\frac{A5}{p4} \cdot (e^{p4 \cdot \Delta t} - 1) \right] \quad (13)$$

$$\Delta us = -695.3816033285$$

$$\text{Find}(A1, A2, A3, A4, A5) \rightarrow \begin{pmatrix} 796.701276552724882 \\ -117.3726420338960495 \\ 299.92022082986761503 \\ 656.15848898220111944 \\ 303.69765295164998956 \end{pmatrix} \quad \begin{array}{l} A1 := 796.701276552724882 \\ A2 := -117.3726420338960495 \\ A3 := 299.92022082986761503 \\ A4 := 656.15848898220111944 \\ A5 := 303.69765295164998956 \end{array}$$

$$F1 := I0 \cdot Rf + (U0 + I0 \cdot r) \cdot \left(1 + \frac{Rf}{Rlv} \right) + (\Delta us + A3 \cdot \sin(\psi) + A4 + A5) \cdot \left(1 + \frac{Rf}{Rlv} + \frac{Rf}{Rd + r} \right) +$$

$$+ C3 \cdot Rf \cdot (W \cdot A3 \cdot \cos(\psi) + p3 \cdot A4 + p4 \cdot A5) = 38646.7878223189$$

$$F2 := C3 \cdot Rf \cdot \left(-W^2 \cdot A3 \cdot \sin(W \cdot \Delta t + \psi) + p3^2 \cdot A4 \cdot e^{p3 \cdot \Delta t} + p4^2 \cdot A5 \cdot e^{p4 \cdot \Delta t} \right) + \left(1 + \frac{Rf}{Rlv} + \frac{Rf}{Rd + r} \right) \cdot$$

$$\left(W \cdot A3 \cdot \cos(W \cdot \Delta t + \psi) + p3 \cdot A4 \cdot e^{p3 \cdot \Delta t} + p4 \cdot A5 \cdot e^{p4 \cdot \Delta t} \right) \quad F2 = 3972808.8749798224$$

$$U_m := \frac{A3 \cdot R_f \cdot C3 \cdot (C1 + C2) \cdot \sqrt{b1^2 \cdot W^2 + (b2 - W^2)^2}}{C1 \cdot W} = 22071.3811469791$$

$$t1 := \frac{1}{W} \arcsin\left(\frac{F1}{U_m} - 1\right) \quad (14)$$

$$t1 = 2.704 \times 10^{-3}$$

$$t2 := \frac{1}{W} \arccos\left(\frac{F2}{W \cdot U_m}\right)$$

$$t2 = 0.0030579811$$

$$T + t1 = 0.0227042382$$

$$\Delta t1 := t2 - t1 = 0.000353743$$

$$\Delta U1(t) := A1 \cdot e^{p1 \cdot t} + A2 \cdot e^{p2 \cdot t} + \Delta u_s$$

$$\Delta U2(t) := A3 \cdot \sin(W \cdot t + \psi) + A4 \cdot e^{p3 \cdot t} + A5 \cdot e^{p4 \cdot t} + \Delta u_s$$

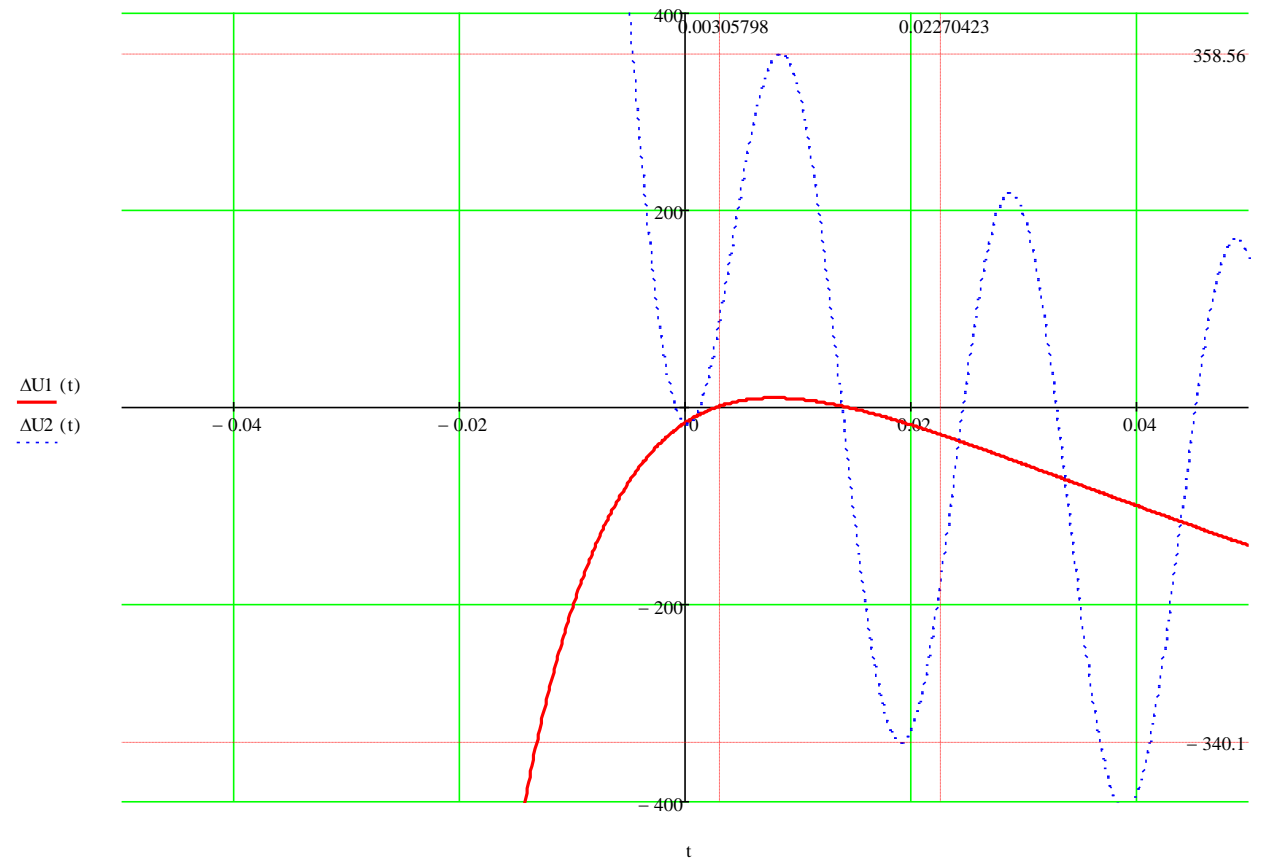


Рисунок 17 – графік пульсацій в випрямлячі при дослідженні точки 1

$$\Delta U_{\max} := 358.56$$

$$\Delta U_{\min} := -340.1$$

$$\Delta := \frac{\Delta U_{\max} - \Delta U_{\min}}{2 \cdot V_0} \cdot 100 = 1.164433333 \quad (\%)$$

$$\begin{aligned} C31 &:= 0.072 \cdot 10^{-6} & \Delta 1 &:= 1.164 & \underline{A1} &:= 796.7012765527248482 & t11 &:= 2.704 \times 10^{-3} \\ & & & & \underline{A2} &:= -117.37264203389604956 & t21 &:= 0.0030579811 \\ & & & & \underline{A3} &:= 299.92022082986761503 \\ & & & & \underline{A4} &:= 656.15848898220111944 \\ & & & & \underline{A5} &:= 303.69765295164998956 \end{aligned}$$

Проведемо аналіз другої точки при C=0,06

$$\begin{aligned} C1 &:= 0.1 \cdot 10^{-6} & V_0 &:= 30000 & r &:= 60000 & f &:= 50 & C3 &:= 0.06 \cdot 10^{-6} \\ & & & & & & & & C2 &:= 0.072 \cdot 10^{-6} \\ I_{lv} &:= 2.5 \cdot 10^{-3} & r_d &:= 22 & R_f &:= 1.78 \cdot 10^6 & \underline{I_0} &:= 0.005 & n &:= 3300 & \Delta t &:= 0.00035872 \end{aligned}$$

$$R_{lv} := 12 \cdot 10^7 \quad \underline{T} := \frac{1}{f} = 0.02 \quad U_0 := 29700$$

$$\underline{W} := 2\pi \cdot f = 314.159265359$$

$$R_d := r_d \cdot n \quad R_d = 72600$$

$$\Delta_{us} := - \frac{I_0 + \frac{1}{R_{lv}} \cdot (U_0 + I_0 \cdot r)}{\frac{1}{R_{lv}} + \frac{1}{R_d + r}} = -695.3816033283$$

$$a1 := \frac{C3 + C2 \cdot \left(1 + \frac{R_f}{R_{lv}} + \frac{R_f}{R_d + r} \right)}{C2 \cdot C3 \cdot R_f} \quad a1 = 142.9962334977$$

$$a2 := \frac{\frac{1}{R_{lv}} + \frac{1}{R_d + r}}{C2 \cdot C3 \cdot R_f} \quad a2 = 981.8210912202$$

$$p1 := -\frac{a1}{2} + \sqrt{\frac{a1^2}{4} - a2}$$

$$p2 := -\frac{a1}{2} - \sqrt{\frac{a1^2}{4} - a2}$$

$$p1 = -7.231798919$$

$$p2 = -135.7644345788$$

$$b1 := \frac{C3 + (C1 + C2) \cdot \left(1 + \frac{Rf}{Rlv} + \frac{Rf}{Rd + r}\right)}{Rf \cdot C3 \cdot (C1 + C2)}$$

$$b1 = 138.4597529356$$

$$b2 := \frac{\frac{1}{Rlv} + \frac{1}{Rd + r}}{Rf \cdot C3 \cdot (C1 + C2)}$$

$$b2 = 410.9948753945$$

$$p3 := -\frac{b1}{2} + \sqrt{\frac{b1^2}{4} - b2}$$

$$p4 := -\frac{b1}{2} - \sqrt{\frac{b1^2}{4} - b2}$$

$$p3 = -3.0348545979$$

$$\psi := \text{atan}\left(\frac{b2 - W^2}{b1 \cdot W}\right) = -1.1541349395$$

$$p4 = -135.4248983377$$

$$A1 := 0 \quad A2 := 0 \quad A3 := 0 \quad A4 := 0 \quad A5 := 0$$

Given

$$W \cdot A3 \cdot \cos(W \cdot \Delta t + \psi) + p3 \cdot A4 \cdot e^{p3 \cdot \Delta t} + p4 \cdot A5 \cdot e^{p4 \cdot \Delta t} = p1 \cdot A1 + p2 \cdot A2 \quad (9)$$

$$W \cdot A3 \cdot \cos(\psi) + p3 \cdot A4 + p4 \cdot A5 = p1 \cdot A1 \cdot e^{p1 \cdot (T - \Delta t)} + p2 \cdot A2 \cdot e^{p2 \cdot (T - \Delta t)} \quad (10)$$

$$A3 \cdot \sin(\psi) + A4 + A5 = A1 \cdot e^{p1 \cdot (T - \Delta t)} + A2 \cdot e^{p2 \cdot (T - \Delta t)} \quad (11)$$

$$A3 \cdot \sin(W \cdot \Delta t + \psi) + A4 \cdot e^{p3 \cdot \Delta t} + A5 \cdot e^{p4 \cdot \Delta t} = A1 + A2 \quad (12)$$

$$\begin{aligned} \frac{A3}{W} (\cos(\psi) - \cos(W \cdot \Delta t + \psi)) &= -\Delta us \cdot T - \left[\frac{A1}{p1} \cdot [e^{p1 \cdot (T - \Delta t)} - 1] \right] - \left[\frac{A2}{p2} \cdot [e^{p2 \cdot (T - \Delta t)} - 1] \right] - \\ &- \left[\frac{A4}{p3} \cdot (e^{p3 \cdot \Delta t} - 1) \right] - \left[\frac{A5}{p4} \cdot (e^{p4 \cdot \Delta t} - 1) \right] \quad (13) \end{aligned}$$

$$\Delta us = -695.3816033283$$

$$\text{Find}(A1, A2, A3, A4, A5) \rightarrow \begin{pmatrix} 787.88163253146645869 \\ -111.03782119983350938 \\ 351.19523383924795264 \\ 653.13808837718200951 \\ 343.84909238553825696 \end{pmatrix} \quad \begin{aligned} \underline{\underline{A1}} &:= 787.88163253146645869 \\ \underline{\underline{A2}} &:= -111.03782119983350938 \\ \underline{\underline{A3}} &:= 351.19523383924795264 \\ \underline{\underline{A4}} &:= 653.13808837718200951 \\ \underline{\underline{A5}} &:= 343.84909238553825696 \end{aligned}$$

$$F1 := I0 \cdot Rf + (U0 + I0 \cdot r) \cdot \left(1 + \frac{Rf}{Rlv}\right) + (\Delta us + A3 \cdot \sin(\psi) + A4 + A5) \cdot \left(1 + \frac{Rf}{Rlv} + \frac{Rf}{Rd + r}\right) +$$

$$+ C3 \cdot Rf \cdot (W \cdot A3 \cdot \cos(\psi) + p3 \cdot A4 + p4 \cdot A5) = 38646.7525081305$$

$$F2 := C3 \cdot Rf \cdot \left(-W^2 \cdot A3 \cdot \sin(W \cdot \Delta t + \psi) + p3^2 \cdot A4 \cdot e^{p3 \cdot \Delta t} + p4^2 \cdot A5 \cdot e^{p4 \cdot \Delta t}\right) + \left(1 + \frac{Rf}{Rlv} + \frac{Rf}{Rd + r}\right) \cdot$$

$$\left(W \cdot A3 \cdot \cos(W \cdot \Delta t + \psi) + p3 \cdot A4 \cdot e^{p3 \cdot \Delta t} + p4 \cdot A5 \cdot e^{p4 \cdot \Delta t}\right) \quad F2 = 3972788.9321185215$$

$$Um := \frac{A3 \cdot Rf \cdot C3 \cdot (C1 + C2) \cdot \sqrt{b1^2 \cdot W^2 + (b2 - W^2)^2}}{C1 \cdot W} = 22071.3152139132$$

$$t1 := \frac{1}{W} \cdot \arcsin\left(\frac{F1}{Um} - 1\right) \quad (14) \quad t1 = 2.704 \times 10^{-3}$$

$$t2 := \frac{1}{W} \cdot \arccos\left(\frac{F2}{W \cdot Um}\right) \quad t2 = 0.0030579856$$

$$\Delta t1 := t2 - t1 = 0.00035373 \quad T + t1 = 0.0227042557$$

$$\Delta U1(t) := A1 \cdot e^{p1 \cdot t} + A2 \cdot e^{p2 \cdot t} + \Delta us$$

$$\Delta U2(t) := A3 \cdot \sin(W \cdot t + \psi) + A4 \cdot e^{p3 \cdot t} + A5 \cdot e^{p4 \cdot t} + \Delta us$$

$$\Delta Umax := 402.29$$

$$\Delta Umin := -402.426$$

$$\Delta := \frac{\Delta Umax - \Delta Umin}{2 \cdot V0} \cdot 100 = 1.3411933333 \quad (\%)$$

$$C32 := 0.06 \cdot 10^{-6} \quad \Delta 2 := 1.341 \quad \begin{array}{l} \underline{\underline{A1}} := 787.88163253146645869 \\ \underline{\underline{A2}} := -111.03782119983350938 \\ \underline{\underline{A3}} := 351.19523383924795264 \\ \underline{\underline{A4}} := 653.13808837718200951 \\ \underline{\underline{A5}} := 343.84909238553825696 \end{array} \quad \begin{array}{l} t12 := 2.704 \times 10^{-3} \\ t22 := 0.0030579856 \end{array}$$

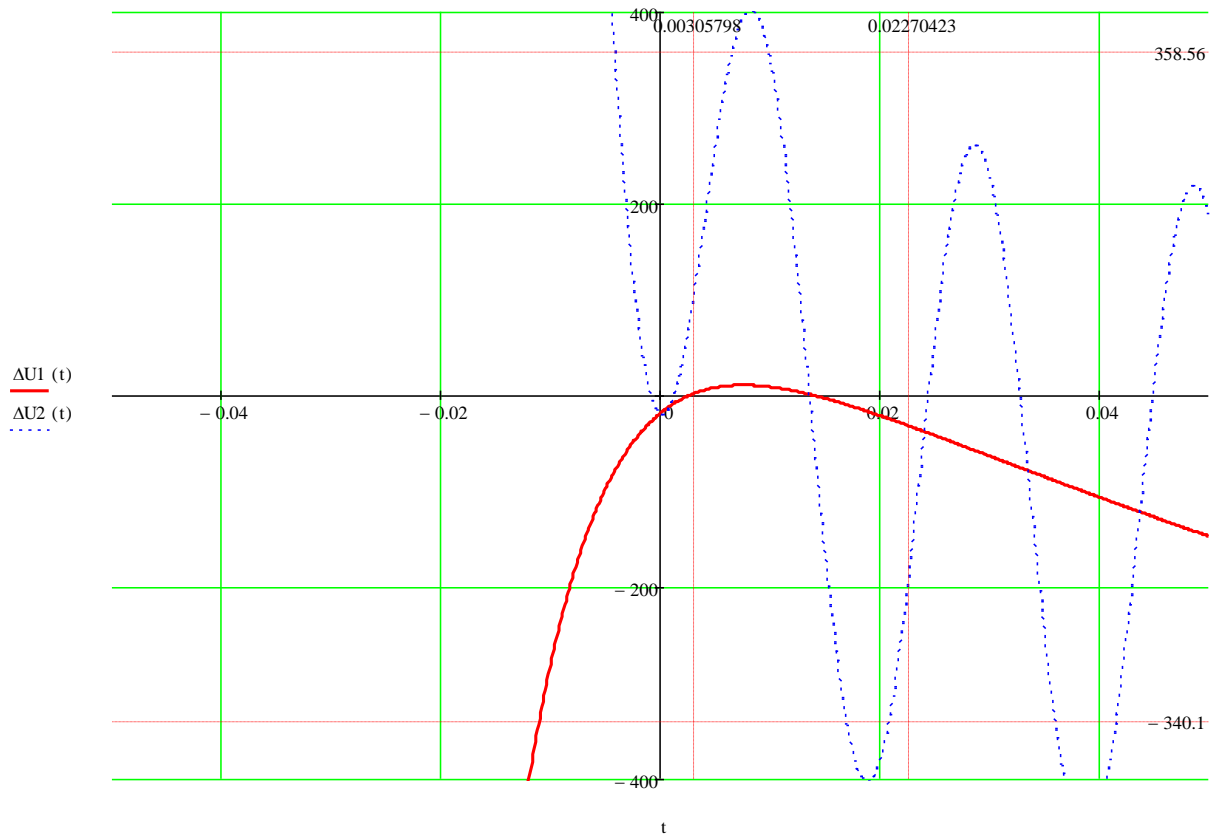


Рисунок 18 – графік пульсацій в випрямлячі при дослідженні точки 2

Проведемо аналіз третьої точки при $C=0,048$

$$\begin{aligned}
 C1 &:= 0.1 \cdot 10^{-6} & V0 &:= 30000 & r &:= 60000 & f &:= 50 & C3 &:= 0.048 \cdot 10^{-6} \\
 & & & & & & & & C2 &:= 0.072 \cdot 10^{-6} \\
 Rlv &:= 2.5 \cdot 10^{-3} & rd &:= 22 & Rf &:= 1.78 \cdot 10^6 & I0 &:= 0.005 & n &:= 3300 & \Delta t &:= 0.00035872 \\
 & & & & & & & & & & & \\
 Rlv &:= 12 \cdot 10^7 & T &:= \frac{1}{f} = 0.02 & U0 &:= 29700 \\
 W &:= 2\pi \cdot f = 314.159265359 \\
 Rd &:= rd \cdot n & Rd &= 72600 \\
 \Delta u_s &:= -\frac{I0 + \frac{1}{Rlv} \cdot (U0 + I0 \cdot r)}{\frac{1}{Rlv} + \frac{1}{Rd + r}} = -695.3816033283 \\
 a1 &:= \frac{C3 + C2 \cdot \left(1 + \frac{Rf}{Rlv} + \frac{Rf}{Rd + r}\right)}{C2 \cdot C3 \cdot Rf} & a1 &= 176.7946052305
 \end{aligned}$$

$$a2 := \frac{\frac{1}{Rlv} + \frac{1}{Rd + r}}{C2 \cdot C3 \cdot Rf} \quad a2 = 1227.2763640252$$

$$p1 := -\frac{a1}{2} + \sqrt{\frac{a1^2}{4} - a2} \quad p1 = -7.2381580558$$

$$p2 := -\frac{a1}{2} - \sqrt{\frac{a1^2}{4} - a2} \quad p2 = -169.5564471747$$

$$b1 := \frac{C3 + (C1 + C2) \cdot \left(1 + \frac{Rf}{Rlv} + \frac{Rf}{Rd + r}\right)}{Rf \cdot C3 \cdot (C1 + C2)} \quad b1 = 172.2581246684$$

$$b2 := \frac{\frac{1}{Rlv} + \frac{1}{Rd + r}}{Rf \cdot C3 \cdot (C1 + C2)} \quad b2 = 513.7435942431$$

$$p3 := -\frac{b1}{2} + \sqrt{\frac{b1^2}{4} - b2} \quad p3 = -3.0359110862$$

$$p4 := -\frac{b1}{2} - \sqrt{\frac{b1^2}{4} - b2} \quad p4 = -169.2222135822$$

$$\psi := \operatorname{atan}\left(\frac{b2 - W^2}{b1 \cdot W}\right) = -1.0670447615$$

$$A1 := 0 \quad A2 := 0 \quad A3 := 0 \quad A4 := 0 \quad A5 := 0$$

Given

$$W \cdot A3 \cdot \cos(W \cdot \Delta t + \psi) + p3 \cdot A4 \cdot e^{p3 \cdot \Delta t} + p4 \cdot A5 \cdot e^{p4 \cdot \Delta t} = p1 \cdot A1 + p2 \cdot A2 \quad (9)$$

$$W \cdot A3 \cdot \cos(\psi) + p3 \cdot A4 + p4 \cdot A5 = p1 \cdot A1 \cdot e^{p1 \cdot (T - \Delta t)} + p2 \cdot A2 \cdot e^{p2 \cdot (T - \Delta t)} \quad (10)$$

$$A3 \cdot \sin(\psi) + A4 + A5 = A1 \cdot e^{p1 \cdot (T - \Delta t)} + A2 \cdot e^{p2 \cdot (T - \Delta t)} \quad (11)$$

$$A3 \cdot \sin(W \cdot \Delta t + \psi) + A4 \cdot e^{p3 \cdot \Delta t} + A5 \cdot e^{p4 \cdot \Delta t} = A1 + A2 \quad (12)$$

$$\frac{A3}{W} (\cos(\psi) - \cos(W \cdot \Delta t + \psi)) = -\Delta us \cdot T - \left[\frac{A1}{p1} \cdot [e^{p1 \cdot (T - \Delta t)} - 1] \right] - \left[\frac{A2}{p2} \cdot [e^{p2 \cdot (T - \Delta t)} - 1] \right] -$$

$$- \left[\frac{A4}{p3} \cdot (e^{p3 \cdot \Delta t} - 1) \right] - \left[\frac{A5}{p4} \cdot (e^{p4 \cdot \Delta t} - 1) \right] \quad (13)$$

$$\text{Find}(A1, A2, A3, A4, A5) \rightarrow \begin{pmatrix} 779.22285393631692869 \\ -105.57276680989028008 \\ 420.86947728275799448 \\ 650.14018307115280985 \\ 390.62796459203875756 \end{pmatrix} \quad \begin{array}{l} A1 := 779.22285393631692869 \\ A2 := -105.57276680989028008 \\ A3 := 420.86947728275799448 \\ A4 := 650.14018307115280985 \\ A5 := 390.62796459203875756 \end{array}$$

$$F1 := I0 \cdot Rf + (U0 + I0 \cdot r) \cdot \left(1 + \frac{Rf}{Rlv}\right) + (\Delta us + A3 \cdot \sin(\psi) + A4 + A5) \cdot \left(1 + \frac{Rf}{Rlv} + \frac{Rf}{Rd + r}\right) +$$

$$+ C3 \cdot Rf \cdot (W \cdot A3 \cdot \cos(\psi) + p3 \cdot A4 + p4 \cdot A5) = 38646.6946827404$$

$$F2 := C3 \cdot Rf \cdot \left(-W^2 \cdot A3 \cdot \sin(W \cdot \Delta t + \psi) + p3^2 \cdot A4 \cdot e^{p3 \cdot \Delta t} + p4^2 \cdot A5 \cdot e^{p4 \cdot \Delta t}\right) + \left(1 + \frac{Rf}{Rlv} + \frac{Rf}{Rd + r}\right) \cdot$$

$$\left(W \cdot A3 \cdot \cos(W \cdot \Delta t + \psi) + p3 \cdot A4 \cdot e^{p3 \cdot \Delta t} + p4 \cdot A5 \cdot e^{p4 \cdot \Delta t}\right) \quad F2 = 3972763.0905332873$$

$$Um := \frac{A3 \cdot Rf \cdot C3 \cdot (C1 + C2) \cdot \sqrt{b1^2 \cdot W^2 + (b2 - W^2)^2}}{C1 \cdot W} = 22071.229091495$$

$$t1 := \frac{1}{W} \arcsin\left(\frac{F1}{Um} - 1\right) \quad (14) \quad t1 = 2.704 \times 10^{-3}$$

$$t2 := \frac{1}{W} \arccos\left(\frac{F2}{W \cdot Um}\right) \quad t2 = 0.0030579914$$

$$\Delta t1 := t2 - t1 = 0.0003537155 \quad T + t1 = 0.022704276$$

$$\Delta U1(t) := A1 \cdot e^{p1 \cdot t} + A2 \cdot e^{p2 \cdot t} + \Delta us$$

$$\Delta U2(t) := A3 \cdot \sin(W \cdot t + \psi) + A4 \cdot e^{p3 \cdot t} + A5 \cdot e^{p4 \cdot t} + \Delta us$$

$$\Delta U_{\max} := 457.652$$

$$\Delta U_{\min} := -484.1654$$

$$\Delta := \frac{\Delta U_{\max} - \Delta U_{\min}}{2 \cdot V0} \cdot 100 = 1.5696956667 \quad (\%)$$

$$C33 := 0.048 \cdot 10^{-6} \quad \Delta 3 := 1.569 \quad \begin{array}{l} A1 := 779.22285393631692869 \\ A2 := -105.57276680989028008 \\ A3 := 420.86947728275799448 \\ A4 := 650.14018307115280985 \\ A5 := 390.62796459203875756 \end{array} \quad \begin{array}{l} t13 := 2.704 \times 10^{-3} \\ t23 := 0.0030579914 \end{array}$$

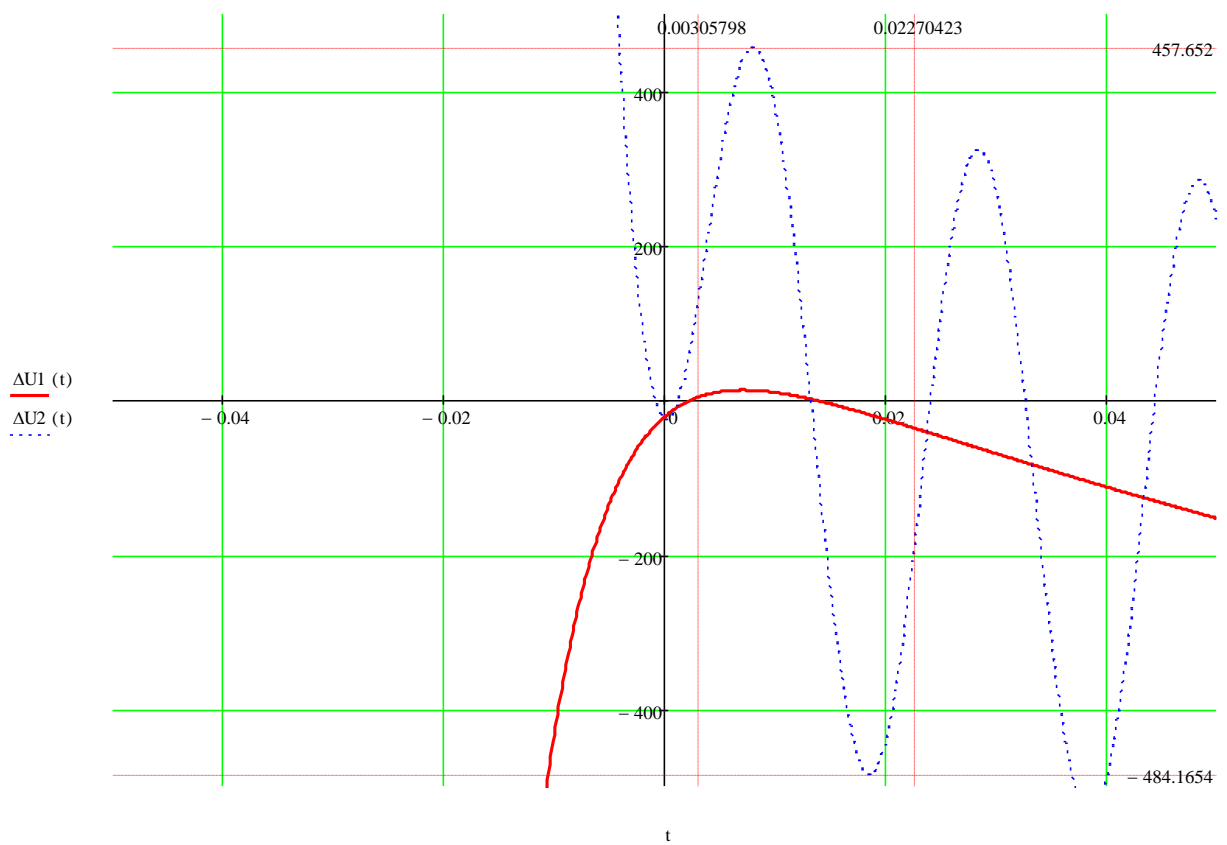


Рисунок 19 – графік пульсацій в випрямлячі при дослідженні точки 3

Проведемо аналіз четвертої точки при $C=0,048$

$$\begin{aligned}
 C1 &:= 0.1 \cdot 10^{-6} & V0 &:= 30000 & r &:= 60000 & f &:= 50 & C3 &:= 0.036 \cdot 10^{-6} \\
 & & & & & & & & C2 &:= 0.072 \cdot 10^{-6} \\
 I_{lv} &:= 2.5 \cdot 10^{-3} & rd &:= 22 & Rf &:= 1.78 \cdot 10^6 & I_{0\omega\omega} &:= 0.005 & n &:= 3300 & \Delta t &:= 0.00035872 \\
 R_{lv} &:= 12 \cdot 10^7 & T_{\omega\omega} &:= \frac{1}{f} = 0.02 & U0 &:= 29700 \\
 W_{\omega\omega} &:= 2\pi \cdot f = 314.159265359 \\
 Rd &:= rd \cdot n & Rd &= 72600
 \end{aligned}$$

$$\Delta_{\text{us}} := -\frac{I0 + \frac{1}{R_{lv}} \cdot (U0 + I0 \cdot r)}{\frac{1}{R_{lv}} + \frac{1}{R_d + r}} = -695.3816033283$$

$$a1 := \frac{C3 + C2 \cdot \left(1 + \frac{R_f}{R_{lv}} + \frac{R_f}{R_d + r}\right)}{C2 \cdot C3 \cdot R_f} \quad a1 = 233.125224785$$

$$a2 := \frac{\frac{1}{R_{lv}} + \frac{1}{R_d + r}}{C2 \cdot C3 \cdot R_f} \quad a2 = 1636.368485367$$

$$p1 := -\frac{a1}{2} + \sqrt{\frac{a1^2}{4} - a2} \quad p1 = -7.2443882833$$

$$p2 := -\frac{a1}{2} - \sqrt{\frac{a1^2}{4} - a2} \quad p2 = -225.8808365017$$

$$b1 := \frac{C3 + (C1 + C2) \cdot \left(1 + \frac{R_f}{R_{lv}} + \frac{R_f}{R_d + r}\right)}{R_f \cdot C3 \cdot (C1 + C2)} \quad b1 = 228.5887442229$$

$$b2 := \frac{\frac{1}{R_{lv}} + \frac{1}{R_d + r}}{R_f \cdot C3 \cdot (C1 + C2)} \quad b2 = 684.9914589908$$

$$p3 := -\frac{b1}{2} + \sqrt{\frac{b1^2}{4} - b2}$$

$$p4 := -\frac{b1}{2} - \sqrt{\frac{b1^2}{4} - b2} \quad p3 = -3.0369587074$$

$$\psi := \text{atan}\left(\frac{b2 - W^2}{b1 \cdot W}\right) = -0.9384556569 \quad p4 = -225.5517855155$$

$$A1 := 0 \quad A2 := 0 \quad A3 := 0 \quad A4 := 0 \quad A5 := 0$$

Given

$$W \cdot A3 \cdot \cos(W \cdot \Delta t + \psi) + p3 \cdot A4 \cdot e^{p3 \cdot \Delta t} + p4 \cdot A5 \cdot e^{p4 \cdot \Delta t} = p1 \cdot A1 + p2 \cdot A2 \quad (9)$$

$$W \cdot A3 \cdot \cos(\psi) + p3 \cdot A4 + p4 \cdot A5 = p1 \cdot A1 \cdot e^{p1 \cdot (T - \Delta t)} + p2 \cdot A2 \cdot e^{p2 \cdot (T - \Delta t)} \quad (10)$$

$$A3 \cdot \sin(\psi) + A4 + A5 = A1 \cdot e^{p1 \cdot (T - \Delta t)} + A2 \cdot e^{p2 \cdot (T - \Delta t)} \quad (11)$$

$$A3 \cdot \sin(W \cdot \Delta t + \psi) + A4 \cdot e^{p3 \cdot \Delta t} + A5 \cdot e^{p4 \cdot \Delta t} = A1 + A2 \quad (12)$$

$$\frac{A3}{W}(\cos(\psi) - \cos(W \cdot \Delta t + \psi)) = -\Delta_{us} \cdot T - \left[\frac{A1}{p1} \cdot [e^{p1 \cdot (T - \Delta t)} - 1] \right] - \left[\frac{A2}{p2} \cdot [e^{p2 \cdot (T - \Delta t)} - 1] \right] - \left[\frac{A4}{p3} \cdot (e^{p3 \cdot \Delta t} - 1) \right] - \left[\frac{A5}{p4} \cdot (e^{p4 \cdot \Delta t} - 1) \right] \quad (13)$$

$$\text{Find}(A1, A2, A3, A4, A5) \rightarrow \begin{pmatrix} 770.72167528819755898 \\ -101.08532315997424988 \\ 517.76338330785021987 \\ 647.16376381612177407 \\ 437.79292851409264987 \end{pmatrix} \quad \begin{array}{l} \underline{\underline{A1}} := 770.72167528819755898 \\ \underline{\underline{A2}} := -101.08532315997424988 \\ \underline{\underline{A3}} := 517.76338330785021987 \\ \underline{\underline{A4}} := 647.16376381612177407 \\ \underline{\underline{A5}} := 437.79292851409264987 \end{array}$$

$$F1 := I0 \cdot Rf + (U0 + I0 \cdot r) \cdot \left(1 + \frac{Rf}{Rlv} \right) + (\Delta_{us} + A3 \cdot \sin(\psi) + A4 + A5) \cdot \left(1 + \frac{Rf}{Rlv} + \frac{Rf}{Rd + r} \right) + C3 \cdot Rf \cdot (W \cdot A3 \cdot \cos(\psi) + p3 \cdot A4 + p4 \cdot A5) = 38646.5944101006$$

$$F2 := C3 \cdot Rf \cdot \left(-W^2 \cdot A3 \cdot \sin(W \cdot \Delta t + \psi) + p3^2 \cdot A4 \cdot e^{p3 \cdot \Delta t} + p4^2 \cdot A5 \cdot e^{p4 \cdot \Delta t} \right) + \left(1 + \frac{Rf}{Rlv} + \frac{Rf}{Rd + r} \right) \cdot (W \cdot A3 \cdot \cos(W \cdot \Delta t + \psi) + p3 \cdot A4 \cdot e^{p3 \cdot \Delta t} + p4 \cdot A5 \cdot e^{p4 \cdot \Delta t}) \quad F2 = 3972730.0371502065$$

$$U_m := \frac{A3 \cdot Rf \cdot C3 \cdot (C1 + C2) \cdot \sqrt{b1^2 \cdot W^2 + (b2 - W^2)^2}}{C1 \cdot W} = 22071.117174329$$

$$t1 := \frac{1}{W} \arcsin\left(\frac{F1}{U_m} - 1\right) \quad (14) \quad t1 = 2.704 \times 10^{-3}$$

$$t2 := \frac{1}{W} \arccos\left(\frac{F2}{W \cdot U_m}\right) \quad t2 = 0.0030579987$$

$$\Delta t1 := t2 - t1 = 0.0003537018 \quad T + t1 = 0.0227042969$$

$$\Delta U1(t) := A1 \cdot e^{p1 \cdot t} + A2 \cdot e^{p2 \cdot t} + \Delta_{us}$$

$$\Delta U2(t) := A3 \cdot \sin(W \cdot t + \psi) + A4 \cdot e^{p3 \cdot t} + A5 \cdot e^{p4 \cdot t} + \Delta_{us}$$

$$\Delta U_{\max} := 529.805$$

$$\Delta U_{\min} := -592.85$$

$$\Delta := \frac{\Delta U_{\max} - \Delta U_{\min}}{2 \cdot V0} \cdot 100 = 1.8710916667 \quad (\%)$$

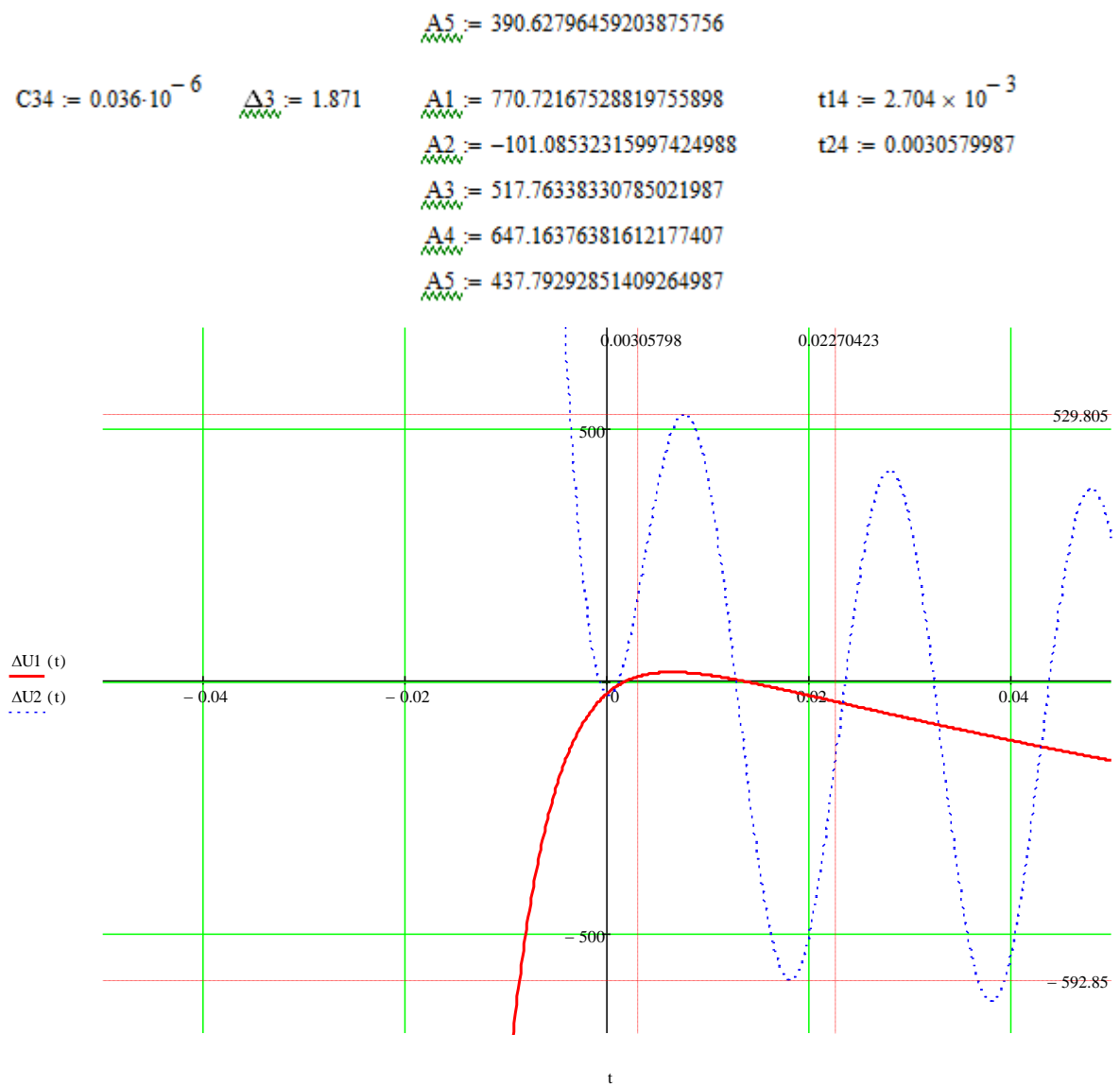


Рисунок 20 – графік пульсацій в випрямлячі при дослідженні точки 4

Проведемо аналіз п'ятої точки при $C=0,024$

$$C1 := 0.1 \cdot 10^{-6} \quad V0 := 30000 \quad r := 60000 \quad f := 50 \quad C3 := 0.024 \cdot 10^{-6} \\ C2 := 0.072 \cdot 10^{-6}$$

$$I_{lv} := 2.5 \cdot 10^{-3} \quad r_d := 22 \quad R_f := 1.78 \cdot 10^6 \quad \underline{I0} := 0.005 \quad n := 3300 \quad \Delta t := 0.00035872$$

$$R_{lv} := 12 \cdot 10^7 \quad \underline{T} := \frac{1}{f} = 0.02 \quad U0 := 29700$$

$$\underline{W} := 2\pi \cdot f = 314.159265359$$

$$R_d := r_d \cdot n \quad R_d = 72600$$

$$\Delta_{us} := -\frac{I0 + \frac{1}{R_{lv}} \cdot (U0 + I0 \cdot r)}{\frac{1}{R_{lv}} + \frac{1}{R_d + r}} = -695.3816033283$$

$$a1 := \frac{C3 + C2 \cdot \left(1 + \frac{R_f}{R_{lv}} + \frac{R_f}{R_d + r}\right)}{C2 \cdot C3 \cdot R_f} \quad a1 = 345.7864638941$$

$$a2 := \frac{\frac{1}{R_{lv}} + \frac{1}{R_d + r}}{C2 \cdot C3 \cdot R_f} \quad a2 = 2454.5527280505$$

$$p1 := -\frac{a1}{2} + \sqrt{\frac{a1^2}{4} - a2} \quad p1 = -7.2504931233$$

$$p2 := -\frac{a1}{2} - \sqrt{\frac{a1^2}{4} - a2} \quad p2 = -338.5359707709$$

$$b1 := \frac{C3 + (C1 + C2) \cdot \left(1 + \frac{R_f}{R_{lv}} + \frac{R_f}{R_d + r}\right)}{R_f \cdot C3 \cdot (C1 + C2)} \quad b1 = 341.249983332$$

$$b2 := \frac{\frac{1}{R_{lv}} + \frac{1}{R_d + r}}{R_f \cdot C3 \cdot (C1 + C2)} \quad b2 = 1027.4871884862$$

$$p3 := -\frac{b1}{2} + \sqrt{\frac{b1^2}{4} - b2} \quad p3 = -3.0379975628$$

$$p4 := -\frac{b1}{2} - \sqrt{\frac{b1^2}{4} - b2} \quad p4 = -338.2119857692$$

$$\psi := \operatorname{atan}\left(\frac{b2 - W^2}{b1 \cdot W}\right) = -0.7388752294$$

$$A1 := 0 \quad A2 := 0 \quad A3 := 0 \quad A4 := 0 \quad A5 := 0$$

Given

$$W \cdot A3 \cdot \cos(W \cdot \Delta t + \psi) + p3 \cdot A4 \cdot e^{p3 \cdot \Delta t} + p4 \cdot A5 \cdot e^{p4 \cdot \Delta t} = p1 \cdot A1 + p2 \cdot A2 \quad (9)$$

$$W \cdot A3 \cdot \cos(\psi) + p3 \cdot A4 + p4 \cdot A5 = p1 \cdot A1 \cdot e^{p1 \cdot (T - \Delta t)} + p2 \cdot A2 \cdot e^{p2 \cdot (T - \Delta t)} \quad (10)$$

$$A3 \cdot \sin(\psi) + A4 + A5 = A1 \cdot e^{p1 \cdot (T - \Delta t)} + A2 \cdot e^{p2 \cdot (T - \Delta t)} \quad (11)$$

$$A3 \cdot \sin(W \cdot \Delta t + \psi) + A4 \cdot e^{p3 \cdot \Delta t} + A5 \cdot e^{p4 \cdot \Delta t} = A1 + A2 \quad (12)$$

$$\begin{aligned} \frac{A3}{W} (\cos(\psi) - \cos(W \cdot \Delta t + \psi)) &= -\Delta_{us} \cdot T - \left[\frac{A1}{p1} \cdot [e^{p1 \cdot (T - \Delta t)} - 1] \right] - \left[\frac{A2}{p2} \cdot [e^{p2 \cdot (T - \Delta t)} - 1] \right] - \\ &- \left[\frac{A4}{p3} \cdot (e^{p3 \cdot \Delta t} - 1) \right] - \left[\frac{A5}{p4} \cdot (e^{p4 \cdot \Delta t} - 1) \right] \quad (13) \end{aligned}$$

$$\text{Find}(A1, A2, A3, A4, A5) \rightarrow \begin{pmatrix} 762.37486334646696325 \\ -97.139826763970207168 \\ 650.6790950802567541 \\ 644.20710827265376584 \\ 455.05359255712613983 \end{pmatrix} \quad \begin{aligned} A1 &:= 762.37486334646696325 \\ A2 &:= -97.139826763970207168 \\ A3 &:= 650.6790950802567541 \\ A4 &:= 644.20710827265376584 \\ A5 &:= 455.05359255712613983 \end{aligned}$$

$$F1 := I0 \cdot Rf + (U0 + I0 \cdot r) \cdot \left(1 + \frac{Rf}{Rlv} \right) + (\Delta_{us} + A3 \cdot \sin(\psi) + A4 + A5) \cdot \left(1 + \frac{Rf}{Rlv} + \frac{Rf}{Rd + r} \right) + \epsilon$$

$$C3 \cdot Rf \cdot (W \cdot A3 \cdot \cos(\psi) + p3 \cdot A4 + p4 \cdot A5) = 38646.4137093735$$

$$F2 := C3 \cdot Rf \cdot \left(-W^2 \cdot A3 \cdot \sin(W \cdot \Delta t + \psi) + p3^2 \cdot A4 \cdot e^{p3 \cdot \Delta t} + p4^2 \cdot A5 \cdot e^{p4 \cdot \Delta t} \right) + \left(1 + \frac{Rf}{Rlv} + \frac{Rf}{Rd + r} \right) \cdot$$

$$\left(W \cdot A3 \cdot \cos(W \cdot \Delta t + \psi) + p3 \cdot A4 \cdot e^{p3 \cdot \Delta t} + p4 \cdot A5 \cdot e^{p4 \cdot \Delta t} \right) \quad F2 = 3972691.7104728692$$

$$U_m := \frac{A3 \cdot Rf \cdot C3 \cdot (C1 + C2) \cdot \sqrt{b1^2 \cdot W^2 + (b2 - W^2)^2}}{C1 \cdot W} = 22070.9816819669$$

$$t1 := \frac{1}{W} \arcsin\left(\frac{F1}{U_m} - 1\right) \quad (14) \quad t1 = 2.704 \times 10^{-3}$$

$$t2 := \frac{1}{W} \arccos\left(\frac{F2}{W \cdot U_m}\right) \quad t2 = 0.0030580065$$

$$T + t1 = 0.0227043092$$

$$\Delta t1 := t2 - t1 = 0.0003536973$$

$$\Delta U1(t) := A1 \cdot e^{p1 \cdot t} + A2 \cdot e^{p2 \cdot t} + \Delta us$$

$$\Delta U2(t) := A3 \cdot \sin(W \cdot t + \psi) + A4 \cdot e^{p3 \cdot t} + A5 \cdot e^{p4 \cdot t} + \Delta us$$

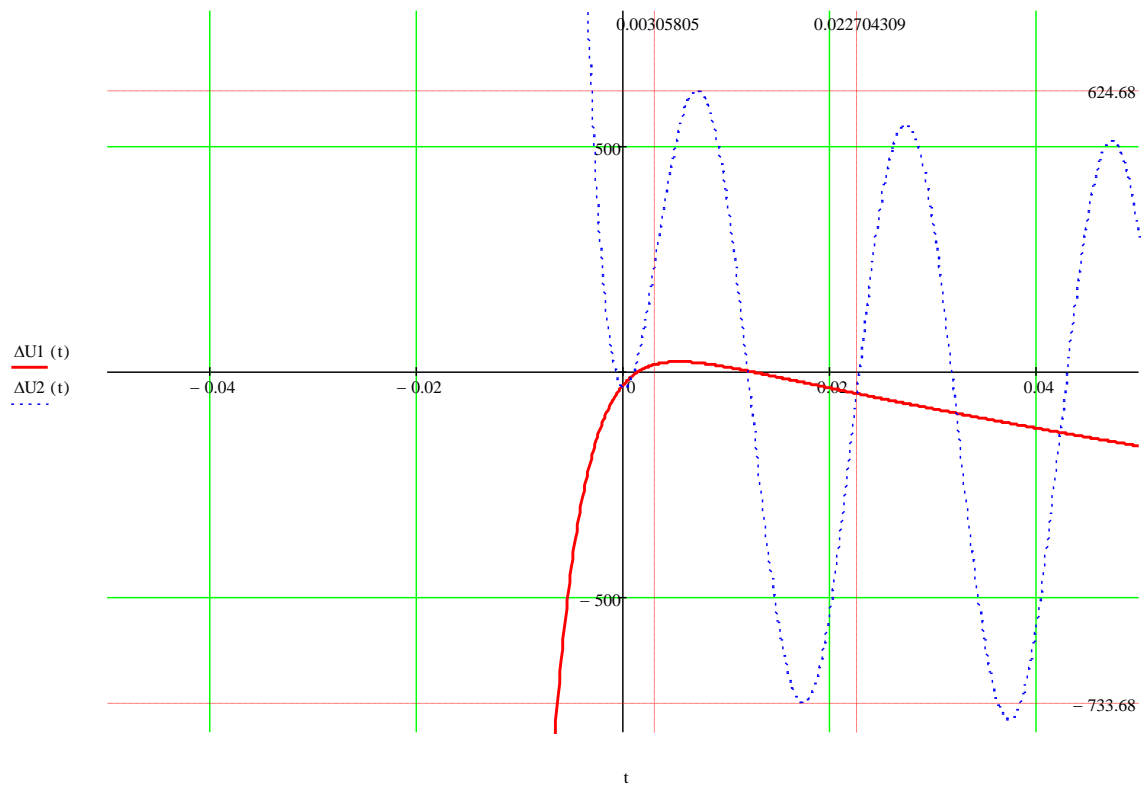


Рисунок 21 – графік пульсацій в випрямлячі при дослідженні точки 5

$$\Delta U_{\max} := 624.68$$

$$\Delta U_{\min} := -733.68$$

$$\Delta := \frac{\Delta U_{\max} - \Delta U_{\min}}{2 \cdot V_0} \cdot 100 = 2.263933333 \quad (\%)$$

$$\begin{aligned} C35 &:= 0.024 \cdot 10^{-6} & \Delta 5 &:= 2.26\% & \underline{A1} &:= 762.37486334646696\% & t15 &:= 2.704 \times 10^{-3} \\ \underline{A2} &:= -97.139826763970207\% & t25 &:= 0.00305800\% \\ \underline{A3} &:= 650.67909508025675 \\ \underline{A4} &:= 644.20710827265376\% \\ \underline{A5} &:= 455.05359255712613\% \end{aligned}$$

Проведемо аналіз п'ятої точки при $C=0,012$

$$\begin{aligned} C1 &:= 0.1 \cdot 10^{-6} & V_0 &:= 30000 & r &:= 60000 & f &:= 50 & C3 &:= 0.012 \cdot 10^{-6} \\ & & & & & & & & C2 &:= 0.072 \cdot 10^{-6} \\ I_{lv} &:= 2.5 \cdot 10^{-3} & r_d &:= 22 & R_f &:= 1.78 \cdot 10^6 & I_0 &:= 0.005 & n &:= 3300 & \Delta t &:= 0.00035872 \end{aligned}$$

$$R_{lv} := 12 \cdot 10^7 \quad \underline{T} := \frac{1}{f} = 0.02 \quad U_0 := 29700$$

$$\underline{W} := 2\pi \cdot f = 314.159265359$$

$$R_d := r_d \cdot n \quad R_d = 72600$$

$$\Delta_{us} := -\frac{I_0 + \frac{1}{R_{lv}} \cdot (U_0 + I_0 \cdot r)}{\frac{1}{R_{lv}} + \frac{1}{R_d + r}} = -695.3816033283$$

$$a1 := \frac{C3 + C2 \cdot \left(1 + \frac{R_f}{R_{lv}} + \frac{R_f}{R_d + r}\right)}{C2 \cdot C3 \cdot R_f} \quad a1 = 683.7701812214$$

$$a2 := \frac{\frac{1}{R_{lv}} + \frac{1}{R_d + r}}{C2 \cdot C3 \cdot R_f} \quad a2 = 4909.1054561009$$

$$p1 := -\frac{a1}{2} + \sqrt{\frac{a1^2}{4} - a2}$$

$$\begin{aligned}
p2 &:= -\frac{a1}{2} - \sqrt{\frac{a1^2}{4} - a2} & p1 &= -7.2564759858 \\
b1 &:= \frac{C3 + (C1 + C2) \cdot \left(1 + \frac{Rf}{Rlv} + \frac{Rf}{Rd + r}\right)}{Rf \cdot C3 \cdot (C1 + C2)} & p2 &= -676.5137052356 \\
b2 &:= \frac{\frac{1}{Rlv} + \frac{1}{Rd + r}}{Rf \cdot C3 \cdot (C1 + C2)} & b1 &= 679.2337006593 \\
p3 &:= -\frac{b1}{2} + \sqrt{\frac{b1^2}{4} - b2} & b2 &= 2054.9743769725 \\
p4 &:= -\frac{b1}{2} - \sqrt{\frac{b1^2}{4} - b2} & p3 &= -3.0390277524 \\
\psi &:= \operatorname{atan}\left(\frac{b2 - W^2}{b1 \cdot W}\right) = -0.4252545637 & p4 &= -676.194672907
\end{aligned}$$

$$A1 := 0 \quad A2 := 0 \quad A3 := 0 \quad A4 := 0 \quad A5 := 0$$

Given

$$W \cdot A3 \cdot \cos(W \cdot \Delta t + \psi) + p3 \cdot A4 \cdot e^{p3 \cdot \Delta t} + p4 \cdot A5 \cdot e^{p4 \cdot \Delta t} = p1 \cdot A1 + p2 \cdot A2 \quad (9)$$

$$W \cdot A3 \cdot \cos(\psi) + p3 \cdot A4 + p4 \cdot A5 = p1 \cdot A1 \cdot e^{p1 \cdot (T - \Delta t)} + p2 \cdot A2 \cdot e^{p2 \cdot (T - \Delta t)} \quad (10)$$

$$A3 \cdot \sin(\psi) + A4 + A5 = A1 \cdot e^{p1 \cdot (T - \Delta t)} + A2 \cdot e^{p2 \cdot (T - \Delta t)} \quad (11)$$

$$A3 \cdot \sin(W \cdot \Delta t + \psi) + A4 \cdot e^{p3 \cdot \Delta t} + A5 \cdot e^{p4 \cdot \Delta t} = A1 + A2 \quad (12)$$

$$\begin{aligned}
\frac{A3}{W} (\cos(\psi) - \cos(W \cdot \Delta t + \psi)) &= -\Delta u_s \cdot T - \left[\frac{A1}{p1} \cdot [e^{p1 \cdot (T - \Delta t)} - 1] \right] - \left[\frac{A2}{p2} \cdot [e^{p2 \cdot (T - \Delta t)} - 1] \right] - \\
&- \left[\frac{A4}{p3} \cdot (e^{p3 \cdot \Delta t} - 1) \right] - \left[\frac{A5}{p4} \cdot (e^{p4 \cdot \Delta t} - 1) \right] \quad (13)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\text{Find}(A1, A2, A3, A4, A5) \rightarrow & \begin{pmatrix} 754.17922087308628147 \\ -90.571059190925208003 \\ 805.66988900774363465 \\ 641.2679641327095973 \\ 345.11067699670456342 \end{pmatrix} & \begin{aligned} A1 &:= 754.17922087308628147 \\ A2 &:= -90.571059190925208003 \\ A3 &:= 805.66988900774363465 \\ A4 &:= 641.2679641327095973 \\ A5 &:= 455.05359255712613983 \end{aligned}
\end{aligned}$$

$$F1 := I0 \cdot Rf + (U0 + I0 \cdot r) \cdot \left(1 + \frac{Rf}{Rlv}\right) + (\Delta us + A3 \cdot \sin(\psi) + A4 + A5) \cdot \left(1 + \frac{Rf}{Rlv} + \frac{Rf}{Rd + r}\right) +$$

$$+ C3 \cdot Rf \cdot (W \cdot A3 \cdot \cos(\psi) + p3 \cdot A4 + p4 \cdot A5) = 38645.5669211534$$

$$F2 := C3 \cdot Rf \cdot \left(-W^2 \cdot A3 \cdot \sin(W \cdot \Delta t + \psi) + p3^2 \cdot A4 \cdot e^{p3 \cdot \Delta t} + p4^2 \cdot A5 \cdot e^{p4 \cdot \Delta t}\right) + \left(1 + \frac{Rf}{Rlv} + \frac{Rf}{Rd + r}\right) \cdot$$

$$\left(W \cdot A3 \cdot \cos(W \cdot \Delta t + \psi) + p3 \cdot A4 \cdot e^{p3 \cdot \Delta t} + p4 \cdot A5 \cdot e^{p4 \cdot \Delta t}\right) \quad F2 = 3972948.5841982695$$

$$Um := \frac{A3 \cdot Rf \cdot C3 \cdot (C1 + C2) \cdot \sqrt{b1^2 \cdot W^2 + (b2 - W^2)^2}}{C1 \cdot W} = 22070.8604415443$$

$$t1 := \frac{1}{W} \arcsin\left(\frac{F1}{Um} - 1\right) \quad (14) \quad t1 = 2.704 \times 10^{-3}$$

$$t2 := \frac{1}{W} \arccos\left(\frac{F2}{W \cdot Um}\right) \quad t2 = 0.0030578504$$

$$\Delta t1 := t2 - t1 = 0.0003536797$$

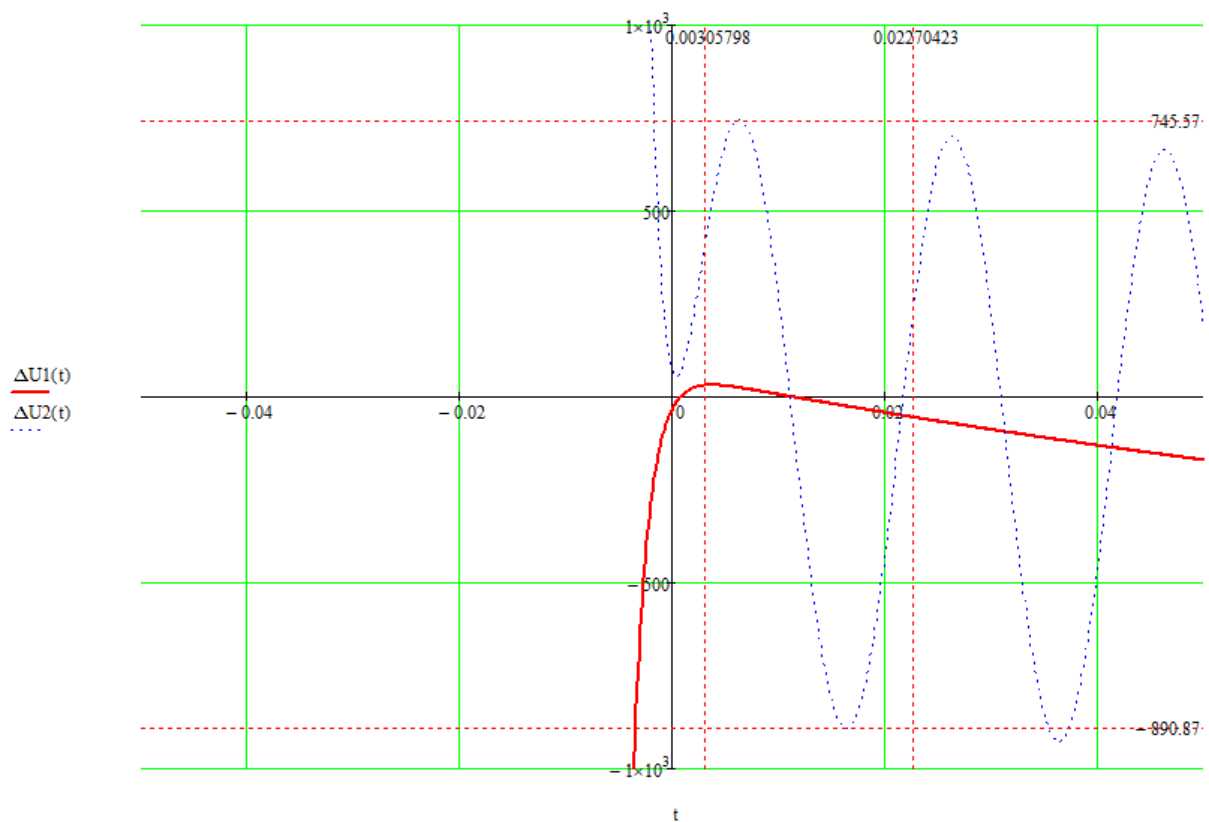


Рисунок 22 – графік пульсацій в випрямлячі при дослідженні точки 6

Таблиця 3 – загальні результати

	A1	A2	A3	A4	A5	t1 (c)	t2 (c)	Δ (%)
$C=0.072 \cdot 10^{-6}$	796.70127 655272484 82	-117.372 6420338 9604956	299.92022 082986761 503	656.1584 8898220 111944	303.69765295 164998956	$2.704 \cdot 10^{-3}$	0.0030 579811	1.164
$C=0.06 \cdot 10^{-6}$	787.88163 253146645 869	-111.037 8211998 3350938	351.19523 383924795 264	653.1380 8837718 200951	343.84909238 553825696	$2.704 \cdot 10^{-3}$	0.0030 579856	1.341
$C=0.048 \cdot 10^{-6}$	779.22285 393631692 869	-105.572 7668098 9028008	420.86947 728275799 448	650.1401 8307115 280985	390.62796459 203875756	$2.704 \cdot 10^{-3}$	0.0030 579914	1.569
$C=0.036 \cdot 10^{-6}$	770.72167 528819755 898	-101.085 3231599 7424988	517.76338 330785021 987	647.1637 6381612 177407	437.79292851 409264987	$2.704 \cdot 10^{-3}$	0.0030 579987	1.871
$C=0.024 \cdot 10^{-6}$	762.37486 334646696 325	-97.1398 2676397 0207168	650.67909 508025675 41	644.2071 0827265 376584	455.05359255 712613983	$2.704 \cdot 10^{-3}$	0.0030 580065	2.263
$C=0.012 \cdot 10^{-6}$	754.17922 087308628 147	-90.5710 5919092 5208003	805.66988 900774363 465	641.2679 6413270 95973	455.05359255 712613983	$2.704 \cdot 10^{-3}$	0.0030 578504	2.727
$C=0$	0	0	0	0	0	0	0	0

Перерозподіл дельта t1

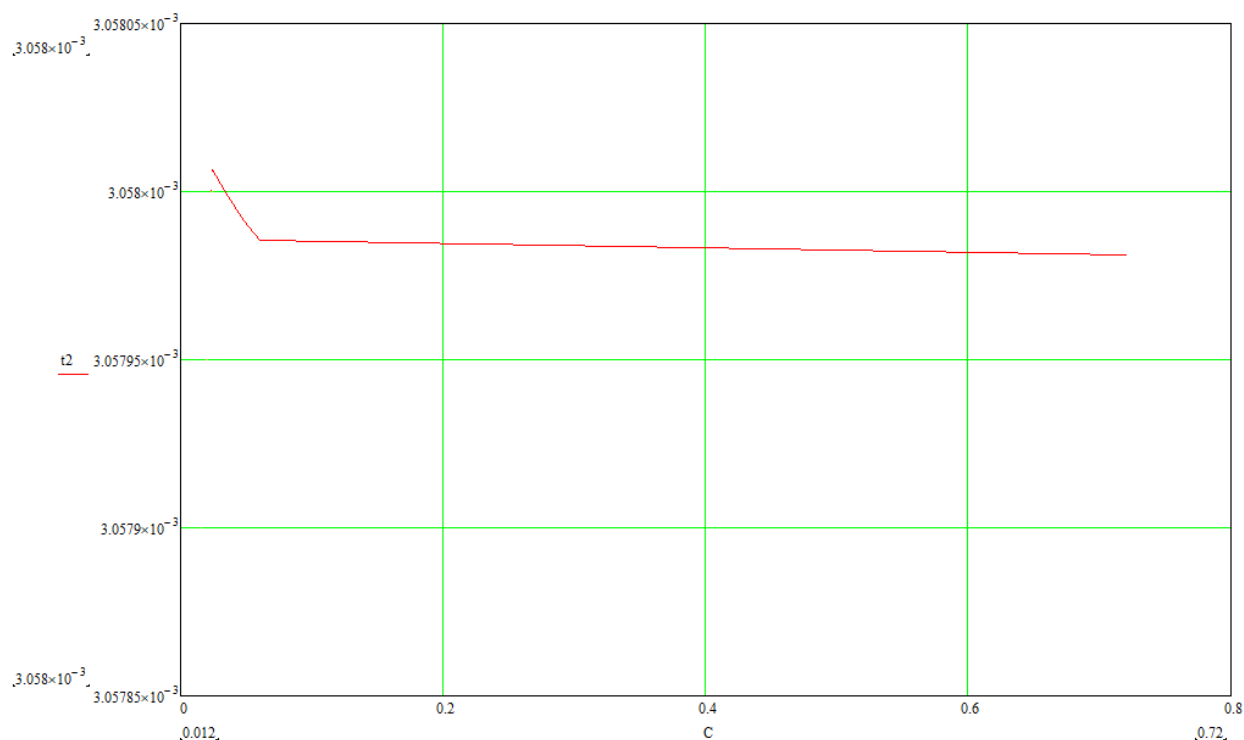


Рисунок 23 – Графік перерозподілу дельта t1

перерозподіл A1, A2, A3, A4, A5

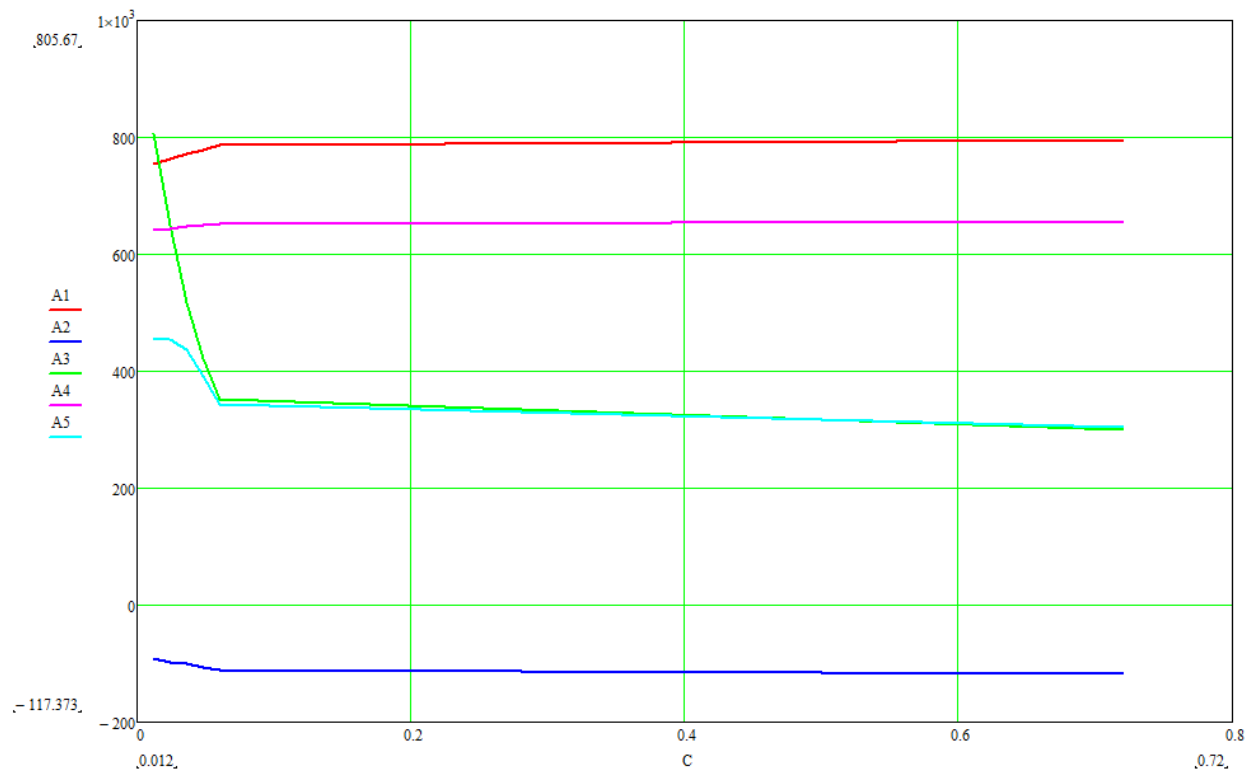


Рисунок 24 – Графік перерозподілу A1, A2, A3, A4, A5

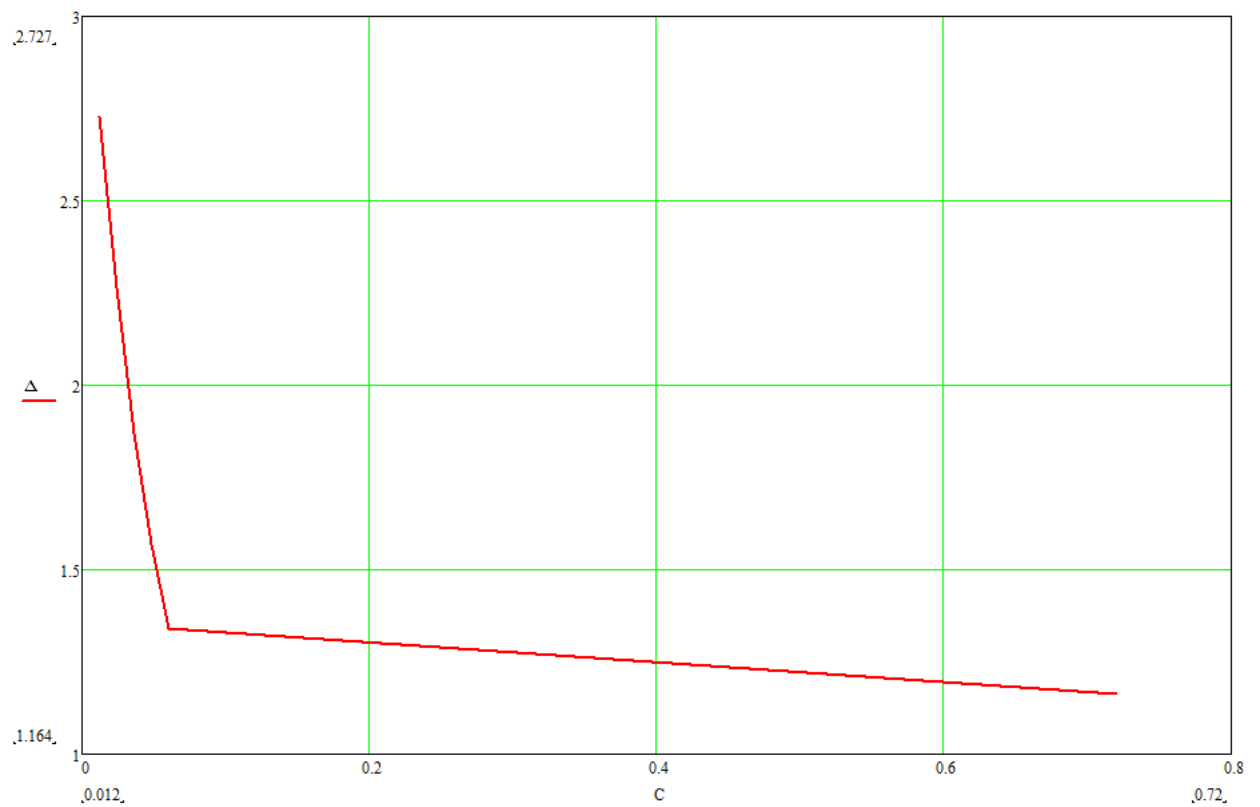


Рисунок 25 – Графік перерозподілу пульсації

$$P_{LV} = f \int_{t_2}^{T+t_1} \frac{[u_{LV}(t)]^2}{R_{LV}} dt + f \int_{t_1}^{t_2} \frac{[u_{LV}(t)]^2}{R_{LV}} dt$$

$$\begin{aligned} \frac{R_{LV} P_{LV}}{f} &= \left(\frac{R_{LV} P_{LV}}{f} \right)^{(1)} + \left(\frac{R_{LV} P_{LV}}{f} \right)^{(2)} = \\ &= \int_{t_2}^{T+t_1} [V_0 + \Delta u_1(t)]^2 dt + \int_{t_1}^{t_2} [V_0 + \Delta u_2(t)]^2 dt \end{aligned}$$

$$V_0 = U_0 + I_0 r$$

$$\begin{aligned} \left(\frac{R_{LV} P_{LV}}{f} \right)^{(1)} &= \left(V_0^{(1)} \right)^2 (T + t_1 - t_2) + \frac{A_1^2}{2p_1} \times \\ &\times \left[e^{2p_1(T+t_1-t_2)} - 1 \right] + \frac{A_2^2}{2p_2} \left[e^{2p_2(T+t_1-t_2)} - 1 \right] + \\ &+ \frac{2V_0^{(1)} A_1}{p_1} \left[e^{p_1(T+t_1-t_2)} - 1 \right] + \frac{2V_0^{(1)} A_2}{p_2} \times \\ &\times \left[e^{p_2(T+t_1-t_2)} - 1 \right] + \frac{2A_1 A_2}{p_1 + p_2} \left[e^{(p_1+p_2)(T+t_1-t_2)} - 1 \right]. \quad (18) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \left(\frac{R_{LV} P_{LV}}{f} \right)^{(2)} &= \left(V_0^{(1)} \right)^2 (t_2 - t_1) + A_3^2 \times \\ &\times \left[\frac{t_2 - t_1}{2} + \frac{1}{4\omega} [\sin(2\psi) - \sin(2(\omega(t_2 - t_1) + \psi))] \right] + \\ &+ \frac{A_4^2}{2p_3} \left[e^{2p_3(t_2-t_1)} - 1 \right] + \frac{A_5^2}{2p_4} \left[e^{2p_4(t_2-t_1)} - 1 \right] + \\ &+ \frac{2V_0^{(1)} A_3}{\omega} [\cos(\psi) - \cos[\omega(t_2 - t_1) + \psi]] + \frac{2V_0^{(1)} A_4}{p_3} \times \\ &\times \left[e^{p_3(t_2-t_1)} - 1 \right] + \frac{2V_0^{(1)} A_5}{p_4} \left[e^{p_4(t_2-t_1)} - 1 \right] + \\ &+ \frac{2A_3 A_4}{\omega \left[\left(\frac{p_3}{\omega} \right)^2 + 1 \right]} \left[e^{p_3(t_2-t_1)} \left(\frac{p_3}{\omega} \sin[\omega(t_2 - t_1) + \psi] - \right. \right. \\ &\left. \left. - \cos[\omega(t_2 - t_1) + \psi] - \frac{p_3}{\omega} \sin(\psi) + \cos(\psi) \right) \right] + \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& + \frac{2A_3A_5}{\omega \left[\left(\frac{p_4}{\omega} \right)^2 + 1 \right]} \left[e^{p_4(t_2-t_1)} \times \right. \\
& \times \left(\frac{p_4}{\omega} \sin[\omega(t_2-t_1)+\psi] - \cos[\omega(t_2-t_1)+\psi] \right) - \\
& \left. - \frac{p_4}{\omega} \sin(\psi) + \cos(\psi) \right] + \frac{2A_4A_5}{p_3+p_4} \left[e^{(p_3+p_4)(t_2-t_1)} - 1 \right]. \quad (19)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
P_i &= f \int_{t_2}^{T+t_1} \left[[V_0 + \Delta u_1(t)] \cdot \left[\frac{\Delta u_1(t)}{R_d + r} + I_0 \right] \right] dt + \\
&+ f \int_{t_1}^{t_2} \left[[V_0 + \Delta u_2(t)] \cdot \left[\frac{\Delta u_2(t)}{R_d + r} + I_0 \right] \right] dt \\
&= \int_{t_2}^{T+t_1} \left[V_0 I_0 + \Delta u_1(t) \left(I_0 + \frac{V_0}{R_d + r} \right) + \frac{(\Delta u_1(t))^2}{R_d + r} \right] dt + \\
&+ \int_{t_1}^{t_2} \left[V_0 I_0 + \Delta u_2(t) \left(I_0 + \frac{V_0}{R_d + r} \right) + \frac{(\Delta u_2(t))^2}{R_d + r} \right] dt. \quad (21)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\left(\frac{P_i}{f} \right)^{(1)} &= V_0 I_0 (T + t_1 - t_2) + \frac{I_0^{(1)} A_1}{p_1} \left[e^{p_1(T+t_1-t_2)} - 1 \right] + \\
&+ \frac{I_0^{(1)} A_2}{p_2} \left[e^{p_2(T+t_1-t_2)} - 1 \right] + I_0^{(1)} \Delta u_s (T + t_1 - t_2) + \\
&+ \frac{V_0^{(2)} A_1^2}{2p_1} \left[e^{2p_1(T+t_1-t_2)} - 1 \right] + \frac{V_0^{(2)} A_2^2}{2p_2} \times \left[e^{2p_2(T+t_1-t_2)} - 1 \right] + V_0^{(2)} (\Delta u_s)^2 (T + t_1 - t_2) + \\
&+ \frac{2V_0^{(2)} A_1 A_2}{p_1 + p_2} \cdot \left[e^{(p_1+p_2)(T+t_1-t_2)} - 1 \right] + \frac{2V_0^{(2)} \Delta u_s A_1}{p_1} \times \\
&\times \left[e^{p_1(T+t_1-t_2)} - 1 \right] + \frac{2V_0^{(2)} \Delta u_s A_2}{p_2} \left[e^{p_2(T+t_1-t_2)} - 1 \right], \quad (22)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\left(\frac{P_i}{f} \right)^{(2)} &= V_0 I_0 (t_2 - t_1) + \frac{I_0^{(1)} A_3}{\omega} [\cos(\psi) - \\
&- \cos[\omega(t_2 - t_1) + \psi]] + \frac{I_0^{(1)} A_4}{p_3} \left[e^{p_3(t_2-t_1)} - 1 \right] + \\
&+ \frac{I_0^{(1)} A_5}{p_4} \left[e^{p_4(t_2-t_1)} - 1 \right] + I_0^{(1)} \Delta u_s (t_2 - t_1) + V_0^{(2)} A_3^2 \times
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& \times \left[\frac{1}{2}(t_2 - t_1) + \frac{1}{4\omega} [\sin(2\psi) - \sin(2(\omega(t_2 - t_1) + \psi))] \right] + \\
& + \frac{V_0^{(2)} A_4^2}{2p_3} \left[e^{2p_3(t_2 - t_1)} - 1 \right] + \frac{V_0^{(2)} A_5^2}{2p_4} \left[e^{2p_4(t_2 - t_1)} - 1 \right] + \\
& + V_0^{(2)} (\Delta u_s)^2 (t_2 - t_1) + \frac{2V_0^{(2)} A_3 A_4}{\omega \left[\left(\frac{p_3}{\omega} \right)^2 + 1 \right]} \left[e^{p_3(t_2 - t_1)} \times \right. \\
& \times \left(\frac{p_3}{\omega} \sin[\omega(t_2 - t_1) + \psi] - \cos[\omega(t_2 - t_1) + \psi] \right) - \\
& - \frac{p_3}{\omega} \sin(\psi) + \cos(\psi) \left. \right] + \frac{2V_0^{(2)} A_3 A_5}{\omega \left[\left(\frac{p_4}{\omega} \right)^2 + 1 \right]} \left[e^{p_4(t_2 - t_1)} \times \right. \\
& \times \left(\frac{p_4}{\omega} \sin[\omega(t_2 - t_1) + \psi] - \cos[\omega(t_2 - t_1) + \psi] \right) - \\
& - \frac{p_4}{\omega} \sin(\psi) + \cos(\psi) \left. \right] + \frac{2V_0^{(2)} \Delta u_s A_3}{\omega} [\cos(\psi) - \\
& - \cos[\omega(t_2 - t_1) + \psi]] + \frac{2V_0^{(2)} A_4 A_5}{p_3 + p_4} \left[e^{(p_3 + p_4)(t_2 - t_1)} - 1 \right] + \\
& + \frac{2V_0^{(2)} \Delta u_s A_4}{p_3} \cdot \left[e^{p_3(t_2 - t_1)} - 1 \right] + \\
& + \frac{2V_0^{(2)} \Delta u_s A_5}{p_4} \left[e^{p_4(t_2 - t_1)} - 1 \right], \quad (23)
\end{aligned}$$

$$\text{где: } I_0^{(1)} = I_0 + V_0 / (R_d + r), \quad V_0^{(2)} = 1 / (R_d + r).$$

$$P_f = f \int_{t_2}^{T+t_1} [(i_{f1})^2 R_f] dt + f \int_{t_1}^{t_2} [(i_{f2})^2 R_f] dt, \quad (24)$$

$$\begin{aligned}
i_{f1} &= I_0 + \frac{U_0 + I_0 r}{R_{LV}} + \Delta u_1(t) \left(\frac{1}{R_{LV}} + \frac{1}{R_d + r} \right) + \\
& + C_3 \frac{d\Delta u_1(t)}{dt}, \\
i_{f2} &= I_0 + \frac{U_0 + I_0 r}{R_{LV}} + \Delta u_2(t) \left(\frac{1}{R_{LV}} + \frac{1}{R_d + r} \right) + \\
& + C_3 \frac{d\Delta u_2(t)}{dt}.
\end{aligned}$$

$$\frac{P_f}{R_f f} = \left(\frac{P_f}{R_f f} \right)^{(1)} + \left(\frac{P_f}{R_f f} \right)^{(2)} =$$

$$= \int_{t_2}^{T+t_1} \left(I_0^{(2)} + \Delta u_1(t) \left(\frac{1}{R_{LV}} + \frac{1}{R_d + r} \right) + C_3 \frac{d\Delta u_1(t)}{dt} \right)^2 dt +$$

$$+ \int_{t_1}^{t_2} \left(I_0^{(2)} + u_2(t) \left(\frac{1}{R_{LV}} + \frac{1}{R_d + r} \right) + C_3 \frac{d\Delta u_2(t)}{dt} \right)^2 dt ,$$

$$\Gamma_{DE}: I_0^{(2)} = I_0 + (U_0 + I_0 r)/R_{LV} .$$

$$\left(\frac{P_3}{R_f f} \right)^{(1)} = \left(I_0^{(3)} \right)^2 (T + t_1 - t_2) + \frac{X_4^2}{2p_1} \left[e^{2p_1(T+t_1-t_2)} - 1 \right] +$$

$$+ \frac{X_5^2}{2p_2} \left[e^{2p_2(T+t_1-t_2)} - 1 \right] + \frac{2I_0^{(3)}X_4}{p_1} \left[e^{p_1(T+t_1-t_2)} - 1 \right] +$$

$$+ \frac{2I_0^{(3)}X_5}{p_2} \left[e^{p_2(T+t_1-t_2)} - 1 \right] + \frac{2X_4X_5}{p_1 + p_2} \times$$

$$\times \left[e^{(p_1+p_2)(T+t_1-t_2)} - 1 \right], \quad (25)$$

$$\left(\frac{P_f}{R_f f} \right)^{(2)} = \left(I_0^{(3)} \right)^2 (t_2 - t_1) + X_1^2 \left[\frac{1}{2} (t_2 - t_1) + \right.$$

$$\left. + \frac{1}{4\omega} [\sin(2\psi) - \sin 2[\omega(t_2 - t_1) + \psi]] \right] + (A_3 \omega C_3)^2 \times$$

$$\times \left[\frac{1}{2} (t_2 - t_1) + \frac{1}{4\omega} [\sin(2[\omega(t_2 - t_1) + \psi]) - \sin(2\psi)] \right] + \frac{X_2^2}{2p_3} \left[e^{2p_3(t_2-t_1)} - 1 \right] + \frac{X_3^2}{2p_4} \left[e^{2p_4(t_2-t_1)} - 1 \right] +$$

$$+ \frac{2I_0^{(3)}X_1}{\omega} [\cos(\psi) - \cos[\omega(t_2 - t_1) + \psi]] +$$

$$+ 2I_0^{(3)}A_3C_3 [\sin[\omega(t_2 - t_1) + \psi] - \sin(\psi)] + \frac{2I_0^{(3)}X_2}{p_3} \times \left[e^{p_3(t_2-t_1)} - 1 \right] + \frac{2I_0^{(3)}X_3}{p_4} \left[e^{p_4(t_2-t_1)} - 1 \right] + \frac{X_1A_3C_3}{2} \times$$

$$\times [\cos(2\psi) - \cos(2[\omega(t_2 - t_1) + \psi])] + \frac{2X_1X_2}{\omega \left[\left(\frac{p_3}{\omega} \right)^2 + 1 \right]} \left[e^{p_3(t_2-t_1)} \times \left(\frac{p_3}{\omega} \sin[\omega(t_2 - t_1) + \psi] - \cos[\omega(t_2 - t_1) + \psi] \right) - \right.$$

$$\left. - \frac{p_3}{\omega} \sin(\psi) + \cos(\psi) \right] + \frac{2X_1X_3}{\omega \left[\left(\frac{p_4}{\omega} \right)^2 + 1 \right]} \left[e^{p_4(t_2-t_1)} \times \right.$$

$$\begin{aligned}
& \times \left(\frac{p_4}{\omega} \cdot \sin[\omega \cdot (t_2 - t_1) + \psi] - \cos[\omega \cdot (t_2 - t_1) + \psi] \right) - \frac{p_4}{\omega} \cdot \sin \psi + \cos \psi \Bigg] + \frac{2X_2 A_3 C_3}{\left(\frac{p_3}{\omega} \right)^2 + 1} \left[e^{p_3 \cdot (t_2 - t_1)} \times \right. \\
& \times \left(\frac{p_3}{\omega} \cdot \cos[\omega \cdot (t_2 - t_1) + \psi] + \sin[\omega \cdot (t_2 - t_1) + \psi] \right) - \\
& \left. - \frac{p_3}{\omega} \cos(\psi) - \sin(\psi) \right] + \frac{2X_3 A_3 C_3}{\left(\frac{p_4}{\omega} \right)^2 + 1} \left[e^{p_4(t_2 - t_1)} \times \right. \\
& \times \left(\frac{p_4}{\omega} \cos[\omega(t_2 - t_1) + \psi] + \sin[\omega(t_2 - t_1) + \psi] \right) - \\
& \left. - \frac{p_4}{\omega} \cos(\psi) - \sin(\psi) \right] + \frac{2X_2 X_3}{p_3 + p_4} \times \\
& \times \left[e^{(p_3 + p_4)(t_2 - t_1)} - 1 \right], \tag{26}
\end{aligned}$$

где:

$$I_0^{(3)} = I_0^{(2)} + \Delta u_s \left(\frac{1}{R_{LV}} + \frac{1}{R_d + r} \right);$$

$$X_1 = A_3 \left(\frac{1}{R_{LV}} + \frac{1}{R_d + r} \right);$$

$$X_2 = A_4 \left(p_3 C_3 + \frac{1}{R_{LV}} + \frac{1}{R_d + r} \right);$$

$$X_3 = A_5 \left(p_4 C_3 + \frac{1}{R_{LV}} + \frac{1}{R_d + r} \right);$$

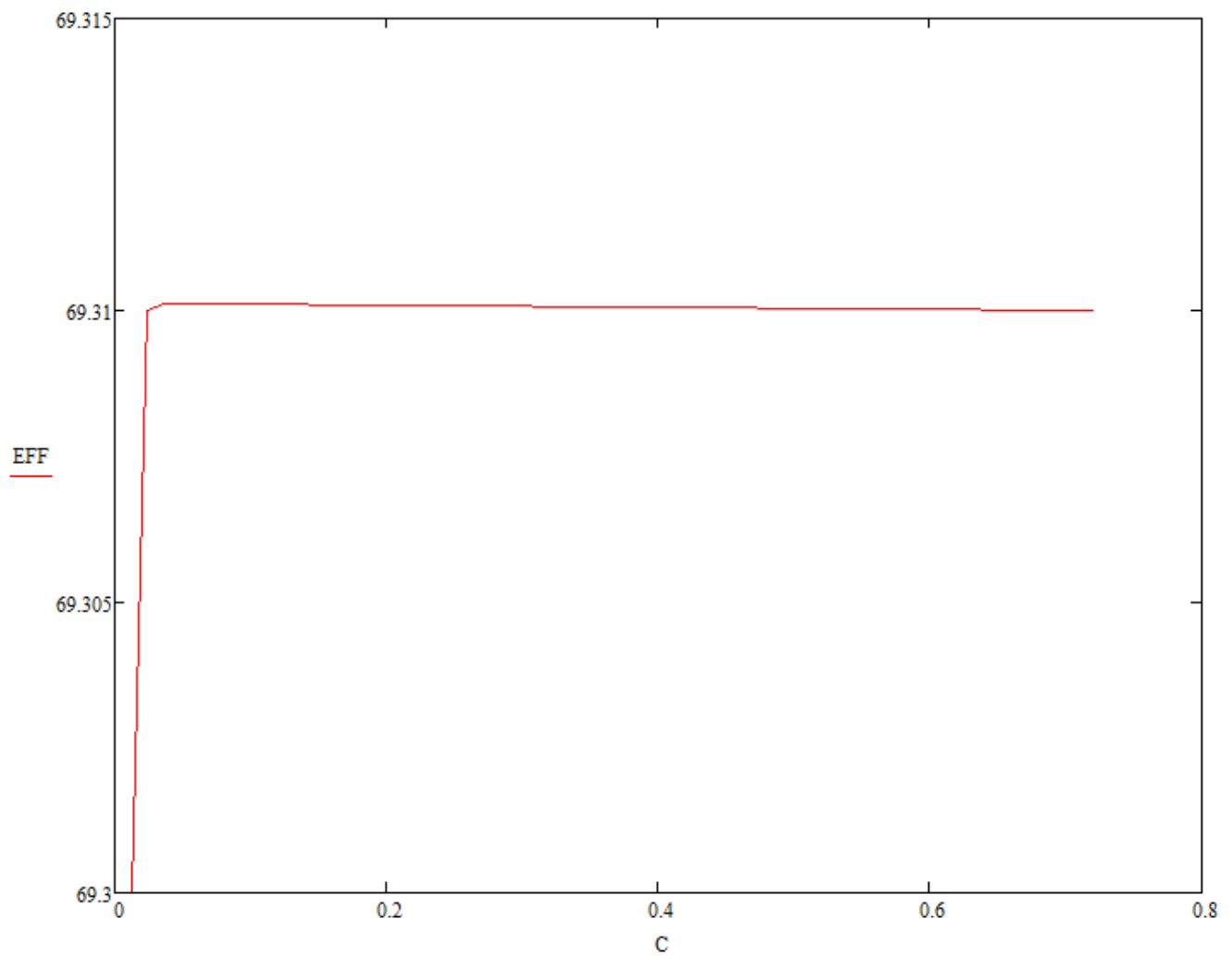
$$X_4 = A_1 \left(p_1 C_3 + \frac{1}{R_{LV}} + \frac{1}{R_d + r} \right);$$

$$X_5 = A_2 \left(p_2 C_3 + \frac{1}{R_{LV}} + \frac{1}{R_d + r} \right).$$

$$\text{Plv} := \frac{\left[\frac{(\text{Rlv} \cdot \text{Plv01})}{\mathbf{f}} + \frac{(\text{Rlv} \cdot \text{Plv02})}{\mathbf{f}} \right] \cdot \mathbf{f}}{\text{Rlv}} = \begin{pmatrix} 9.2562786641 \\ 9.2562786687 \\ 9.2562786746 \\ 9.2562786819 \\ 9.2562786898 \\ 9.2562785317 \end{pmatrix}$$

$$P_i := \left[\frac{(P_{i01})}{f} + \frac{(P_{i02})}{f} \right] \cdot f = \begin{pmatrix} 44839.377892767 \\ 44839.3711806426 \\ 44839.36252946 \\ 44839.3516409026 \\ 44839.3400065536 \\ 44839.5728426859 \end{pmatrix} \quad P_f := \left[\left(\frac{P_{f01}}{R_f \cdot f} \right) + \left(\frac{P_{f02}}{R_f \cdot f} \right) \right] \cdot R_f \cdot f = \begin{pmatrix} 0.0000009162 \\ 0.0000009162 \\ 0.0000009162 \\ 0.0000009162 \\ 0.0000009162 \\ 0.0000009162 \end{pmatrix}$$

$$EFF := \frac{P_{lv} + P_i}{P_{lv} + P_i + P_f} \cdot 100 \quad EFF = \begin{pmatrix} 69.31 \\ 69.312 \\ 69.312 \\ 69.313 \\ 69.313 \\ 69.3 \end{pmatrix}$$



Розділ 4

СТАРТАП – ПРОЕКТ. ВПРОВАДЖЕННЯ АНАЛІЗУ ЗАЛЕЖНОСТІ ВПЛИВУ НАВАНТАЖУВАЛЬНОЇ ЄМНОСТІ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ СПЕЦІАЛІЗОВАНОГО ВИСОКОВОЛЬТНОГО ОДНОФАЗНОГО ВИПРЯМЛЯЧА З ПОДВОЄННЯМ НАПРУГИ ТА ВИКОРИСТАННЯ ЙОГО УДОСКОНАЛЕНОЇ МОДЕЛІ

Вступ

В даному розділі магістерської дисертації розглядається ідея розроблення стартап-проекту по запропонованому аналізу впливу навантажувальної ємності на характеристики спеціалізованого високовольтного однофазного випрямляча з подвоєнням напруги, який дозволить знизити собівартість, в порівнянні з існуючими конкурентними рішеннями. Розділ

розділено на такі основні етапи:

1. Опис ідеї технології;
2. Технологічний аудит ідеї проекту.
3. Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту

4.1 Опис ідеї технології

Різносторонність джерел високої напруги, що засновані на основі спеціалізованого випрямляча та різноманіття використання високих напруг для сталих режимів технологічних установок (електрофільтри вугільних електростанцій, пристрої електрофарбування і напилення покриттів, електросепаратори). Потужні джерела, це зазвичай ланцюги, що як правило, що складаються з діодів і конденсаторів. Завдяки досягненню високої якості в виробництві високовольтних діодів для отримання необхідного рівня напруги найвища ефективність досягається за використання генератора

Кокрофта-Уолтона з збільшенням вдвоє випрямленої напруги, а для зниження пульсації напруги - доповнювати його R, C –фільтром.

На зараз досконала математична модель високовольтного генератора Кокрофта-Уолтона не створена. Сучасні публікації по данній моделі дають не точні результати по величинам пульсацій напруги, являються неточними або відсутні аналітичні вирази для пульсацій.

Багато характеристик, які мають бути враховані при побудові моделі роботи схеми обчислені приблизно, з «запасами», та не мають достатньо чітко обгрунтованої наукової теоретичної бази, що дозволяє вибрати елементи, що є одночасно найбільш ефективними та найбільш вигідними в економічному плані. Це змушувало моделювати класичні варіанти схем спеціалізованих високовольтних випрямлячів використовуючи більш дорогі елементи з надлишково високими характеристиками без значного підвищення ефективності роботи схеми та надійності високовольтного однофазного випрямляча в цілому.

Зважаючи на це виникає необхідність запропонованого аналізу впливу навантажувальної ємності на характеристики спеціалізованого високовольтного однофазного випрямляча з подвоєнням напруги, який дозволить знизити собівартість, в порівнянні з існуючими конкурентними рішеннями. Цьому сприяє розвиток схемотехнічного та математичного моделювання. [18]

Для цілісного уявлення про зміст ідеї та можливі базові потенційні ринки використаємо дані таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 - Опис ідеї стартап-проекту [18]

Зміст ідеї	Напрямки застосування	Вигоди для користувача
Зменшення собівартості, оптимізація роботи схеми спеціалізованого високовольтного однофазного випрямляча з подвоєнням напруги	1. Електричні фільтруючі системи (для високої напруги)	Збільшення ефективності роботи схеми
	2. Електрофарбування	Зменшення собівартості
	3. Нанесення порошкових покриттів	Підвищення ефективності та якості продукції
	4. Випробувальні та вимірювальні установки	Зменшення вартості установок та випробувань

Після аналізу всіх цих аспектів можна впевнено сказати про доцільність і ефективність вводу цієї ідеї як об'єкта для стартапу. [18]

Для успішного комерційного впровадження ідеї необхідно визначити потенційні сильні, слабкі та нейтральні сторони проекту. Проведений аналіз потенційних техніко-економічних переваг варіантів, показаний на табл. 4.2, що передбачає визначення переліку техніко-економічних властивостей та характеристик ідеї, проведений порівняльний аналіз показників: для власної ідеї визначені показники, що мають а) гірші значення (W, слабкі); б) аналогічні (N, нейтральні) значення; в) кращі значення (S, сильні). [18]

Таблиця 4.2 - Визначення сильних, слабких та нейтральних характеристик ідеї використання удосконаленої моделі спеціалізованого високовольтного однофазного випрямляча з подвоєнням напруги. [18]

№ п/ п	Техніко-економічні характеристики ідеї	товари конкурентів			W (слабка сторона)	N (нейтра- льна сторона)	S (сильна сторона)
		Мій проект	ABB	Siemens			
1.	Використання удосконаленої схеми дозволяє зменшити собівартість	+	-	-			+
2.	Зменшення ємності конденсатора призводить до незначного збільшення пульсації врямленого струму в схемі, але в межах дозволених ГОСТ 1516.2	+	+	+		+	
3.	Зменшення ємності конденсатора призводить до оптимізації роботи схеми за рахунок зменшення напруги заряджання	+	-	-			+
4.	Зменшення електроспоживання за рахунок зменшення циклу заряджання схеми	+	-	-			+
5.	За рахунок використання більш сучасних елементів збільшується надійність схеми	+	-	-			+
6.	Незначне підвищення чутливості до коливаний напруги в мережі	-	+	+	+		

За приведеним переліком слабких, сильних та нейтральних характеристик та властивостей ідеї потенційного товару можна стверджувати про конкурентоспроможність удосконаленої моделі спеціалізованого високовольтного однофазного випрямляча з подвоєнням напруги. [18]

4.3. Технологічний аудит ідеї проекту

В межах даного підрозділу проведений аудит технології, за допомогою якої можна реалізувати ідею проекту (технології створення товару). [18]

Визначення технологічної здійсненності ідеї проекту передбачає аналіз таких

складових (таблиця 11):

- за якою технологією буде виготовлено товар згідно ідеї проекту?
- чи існують такі технології, чи їх потрібно розробити/доробити?
- чи доступні такі технології авторам проекту?

Таблиця 4.3 - Технологічна здійсненність ідеї зменшення собівартості, оптимізація роботи схеми спеціалізованого високовольтного однофазного випрямляча з подвоєнням напруги. [18]

№ п/п	Ідея проекту	Технології її реалізації	Наявність технологій	Доступність технологій
1	Дослідити та проаналізувати вплив навантажувальної ємності на роботу випрямляча, оптимізувавши роботу схеми	Дану модель схеми можливо створити за допомогою будь-якої програми призначеної для інженерно математичного програмного забезпечення	Дана технологія наявна , але її потрібно доробити	Авторам проекту вони доступні.
Обрані технології реалізації ідеї проекту: схема високовольтного випрямляча				

Висновок: аби впровадити запропоновані ідеї потрібно мати доступ до будь-якої програми інженерно математичного програмного забезпечення. В даному випадку використовується програма MathCAD оскільки вона повністю задовольняє всі вимоги.

4.3. Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту

Розрахунок економічної ефективності застосування нової моделі спеціалізованого високовольтного однофазного випрямляча з подвоєнням напруги необхідно виконати з урахуванням перспективної ціни, яка буде менше. Це підтверджує досвід виробничого об'єднання з розробки та виготовлення перетворювальних пристроїв. [18]

Таблиця 4.4 - Попередня характеристика потенційного ринку стартап-проекту впровадження та використання удосконаленої моделі спеціалізованого високовольтного однофазного випрямляча [18]

№ п/п	Показники стану ринку (найменування)	Характеристика
1	Кількість головних гравців, од	10
2	Загальний обсяг продаж, грн/ум.од	~55000000
3	Динаміка ринку (якісна оцінка)	Зростає
4	Наявність обмежень для входу	Виробники приймуть модель як доцільну лише після порівняння
5	Специфічні вимоги до стандартизації та сертифікації	Немає
6	Середня норма рентабельності в галузі (або по ринку), %	Невідома

Роблячи висновок з таблиці 4.4 потрібно зазначити, що вихід на ринок не має перешкод та має порівняно прості вимоги до впровадження на підприємствах. [18]

Потенційними клієнтами є група підприємств які часто створюють сучасні типи спеціалізованих високовольтних випрямлячів, підприємства що активно використовують електролітичне гальванування, електростатичну

фільтрацію газів від твердих частинок, та займаються метрологічними дослідженнями та використовують високовольтні вимірювальні установки.

Таблиця 4.5 - Характеристика потенційних клієнтів стартап-проекту впровадження та використання удосконаленої моделі спеціалізованого високовольтного однофазного випрямляча [18]

№ п/п	Потреба, що формує ринок	Цільова аудиторія (цільові сегменти ринку)	Відмінності у поведінці різних потенційних цільових груп клієнтів	Вимоги споживачів до товару
1	Висока собівартість схеми спеціалізованого високовольтного випрямляча при аналогічній чи гіршій ефективності	Підприємства та організації, що активно використовують електролітичне гальванування, електростатичну фільтрацію газів від твердих частинок,	Поведінку клієнта формують інші моделі які були створені раніше.	Використовувати лише в деякому затвердженому діапазоні.
2	Висока собівартість схеми високовольтного випрямляча	Організації що займаються метрологічними дослідженнями та використовують високовольтні вимірювальні установки.	Поведінку клієнта формують стандарти ГОСТ, ISO, ДСТУ	Використовувати лише строго по стандартизованій системі вимірювань та випробувань.(точність роботі схеми має бути підтверджена)
3	Висока собівартість високовольтного випрямляча	Виробники високовольтних випрямлячів.	Поведінку клієнта формують стандарти ГОСТ, ISO, ДСТУ а також явність економічних переваг над другими моделями	Застосовувати лише в електротехніці

За визначеними факторами конкурентоспроможності проведений
аналіз сильних та слабких сторін стартап-проекту

Таблиця 4.6 - Фактори загроз [18]

№ п/п	Фактор	Зміст загрози	Можлива реакція компанії
1	Насичення ринку продукцією, існує попит на заміну	На ринку високовольтних випрямлячів на зараз відсутній підвищений інтерес до новинок. Ринок споживача а не продавця	Активні заходи з просування
2	Зростання інтенсивності інтересу з боку іноземних конкурентів	Посилення конкурентної боротьби	Чітке позиціонування на сегмент економ

Таблиця 4.7 - Фактори можливостей [18]

№ п/п	Фактор	Зміст можливості	Можлива реакція компанії
1	Зростання інтересу інвесторів у продукції галузі	За специфікою побудови старих моделей нові швидко зацікавлять простою модернізацією та значним економічним ефектом	Потенційне розширення виробництва
2	Зростання загального обсягу виробництва клієнтської галузі	Збільшення попиту на компоненти	Планування резерву до розширення виробництва
3	Зростання курсу валюти, зростання вартості електроенергії	Зростання загальних витрат споживачів, зростання значущості ціни закупівель	Позиціонуванн я за ціною

Таблиця 4.8 - Аналіз конкуренції в галузі за М. Портером [18]

Складові аналізу	Прямі конкуренти в галузі	Потенційні конкуренти	Постачальники	Клієнти	Товари-замінники
	ABB Siemens	Pulsar	Велика кількість постачальників	Укренерго, Укрдержме трстандарт	Немає
Висновки	Інтенсивність конкурентної боротьби є середньою	Вихід на ринок є.Конкурентів достатньо, можливі загрози	Постачальник не диктує умови.	Відповідність товару всім ГОСТ, ДСТУ, ISO, та економічна вигода	Немає, оскільки інші моделі дорожче та мають гірші характеристики.

Оптимізована схема є доволі універсальною та має не багато конкуренції, завдяки покращенню його економічних показників при збереженні та покращенні електротехнічних характеристик схеми - що робить його привабливим для клієнтів. Тому схема буде привабливою для підприємств та науково дослідних центрів, що займаються створенням спеціалізованих високовольтних випрямлячів та метрологічними дослідженнями, використовують високовольтні вимірювальні установки..

Таблиця 4.9 - Порівняльний аналіз сильних та слабких сторін впровадження та використання удосконаленої моделі спеціалізованого високовольтного однофазного випрямляча. [18]

№	Фактор конкурентоспроможності	Бали 1-20	Порівняння товарів конкурентів						
			-3	-2	-1	0	+1	+2	+3
1.	Врахування основних електричних характеристик високовольтних випрямлячів	19		A S					
2.	Зменшення собівартості	19		A S					
3.	Використання матеріалів, з іншої науковій літературі	5				A S			
4.	Використання матеріалів що підвищують загальну надійність схеми	19		A S					
5.	Необхідний для детального аналізу схеми час	17					A S		

Роблячи висновок з таблиці 4.9 можна зробити висновки: стартап-проект має такі основні переважаючі фактори конкурентоспроможності, як врахування основних електричних характеристик високовольтних випрямлячів, зменшення собівартості, використання матеріалів що підвищують загальну надійність схеми в сумі, які дають рейтинг товарів-конкурентів “-6”. [18]

На основі порівняльного аналізу сильних і слабких сторін впровадження та використання удосконаленої моделі спеціалізованого високовольтного однофазного випрямляча та факторів загроз і можливостей проведено SWOT-аналіз стартап-проекту, який наведено у таблиці 4.10.

Таблиця 4.10 - SWOT- аналіз стартап-проекту [18]

<u>Сильні сторони:</u>	Слабкі сторони:
Врахування основних електричних характеристик високовольтних випрямлячів	Необхідний для детального аналізу схеми час
Зменшення собівартості	Використання матеріалів, з іншої науковій літературі
Використання матеріалів що підвищують загальну надійність схеми	
Можливості: на основі аналізу впливу навантажувальної ємності на характеристики та використання удосконаленої моделі високовольтного випрямляча можливо створювати та удосконалювати існуючі моделі високовольтного випрямляча та модернізувати старі.	Загрози: Необхідність модернізації існуючих та створення нових високовольтних випрямлячів повинна бути обґрунтована глибоким аналізом, що потребує наукової бази – що може відлякати підприємства та організації з занадто малими обсягами

Найкращий період для введення в аиробниство та впровадження удосконаленої моделі спеціалізованого високовольтного однофазного випрямляча у преріод з 2019 по 2021 рік, після даного детального аналізу моделі. [18]

4.4. Розроблення ринкової стратегії

Таблиця 4.11 - Вибір цільових груп потенційних споживачів [18]

№ п/п	Опис профілю цільової групи потенційних клієнтів	Готовність споживачів сприйняти продукт	Орієнтовний попит в межах цільової групи (сегменту)	Інтенсивність конкуренції в сегменті	Простота входу у сегмент
1	Виробництво з застосуванням фільтрації газів від твердих частинок та електролітичне гальванування	Достатня	Схема може користати ся великим попитом	Можлива	Проста, через велику собівартість старої схеми
2	Науково-дослідні центри	Велика	Схема може користати ся великим попитом	Немає	Проста, через збереження та покращення характеристик
Які цільові групи обрано: обидві					

Основною ідеєю кампанії є зменшення собівартості модернізованої моделі схеми, кампанія зосереджена на двох сегментах розвитку, використовується стратегія лідерства по витратам

Таблиця 4.12 - Визначення базової стратегії конкурентної поведінки

[18]

№ п/п	Чи є проект «першопрохідцем» на ринку?	Чи буде компанія шукати нових споживачів, або забирати існуючих у конкурентів?	Чи буде компанія копіювати основні характеристики товару конкурента, і які?	Стратегія конкурентної поведінки*
1	Ні	Так, так	Ні	Лідерства по витратах

Таблиця 4.13 - Визначення стратегії позиціонування [18]

№ п/п	Вимоги до товару цільової аудиторії	Базова стратегія розвитку	Ключові конкурентоспро можні позиції власного стартап-проекту	Вибір асоціацій, які мають сформулювати комплексну позицію власного проекту (три ключових)
11	Універсальність, інтуїтивність і простота у налаштуванні	Привабливості більшій кількості клієнтів	Новизна та оптимізація існуючих аналогів	Економічність, рентабельність, доступна для розуміння

Розвиток полягає у створенні схеми яка відрізняється від аналогів, якщо такі існують, та удосконалення його на всіх платформах, що можуть використовувати даний продукт.

4.5. Розроблення маркетингової програми стартап-проекту

Таблиця 4.14 - Визначення ключових переваг концепції потенційного товару [18]

№ п/п	Потреба	Вигода, яку пропонує товар	Ключові переваги перед конкурентами (існуючі або такі, що потрібно створити)
1	Наукова база, інвестиції.	Вигода при побудові нових схем, і оптимізації старих джерел високої напруги	Аналоги відсутні

4.6 Розроблення маркетингової програми стартап-проекту

На основі попередніх даних, аналізу схеми, отриманих в результаті розробки стартап проекту знованого на аналізі спеціалізованого високовольтного випрямляча сформуємо маркетингову концепцію товару. Для цього в таблиці 4.15 визначимо ключові переваги концепції

Таблиця 4.15 - Визначення ключових переваг концепції
потенційного товару [18]

п/п	Потреба	Вигода, яку пропонує товар	Ключові переваги перед конкурентами (існуючі або такі, що потрібно створити)
	Виробництво (та як наслідок закупівля сировини) чи закупівля необхідних компонентів для схеми	Зменшення собівартості	Глибокий аналіз схеми на основі розвинутої теорії, що дає змогу точно визначати необхідні характеристики для конкретних цілей схеми
	Глибокі дослідження на основі наукової бази	Врахування основних електричних характеристик високовольтних випрямлячів	Чітка відповідність стандартам та нормам, відсутність погіршення характеристик, наявність покращення характеристик
	Сучасні матеріали та спеціалізована сировина	Використання новітніх матеріалів	Підвищення надійності

Далі, в таблиці 4.16 на основі отриманих маркетингових переваг ми маємо змогу розробити трирівневу маркетингову модель продукту та його фізичні складові, та особливості

Таблиця 4.16 - Опис трьох рівнів моделі товару [18]

Рівні товару	Сутність та складові		
Оптимізована схема випрямляча напруги	Схема стає значно дешевша в собівартості, та ефективніша за характеристиками		
Спеціалізований високовольтний випрямляч з подвоєнням напруги	Властивості/характеристики	%	Од
	1. Економічні – понищено собівартість	5	(у.о)
	2. Технологічні – схема оптимізована	1,1	(пульс.)
	ГОСТ 1516.2		
	Дерев'яний ящик		
	В залежності від цільового користувача - спеціалізований високовольтний випрямляч		
Новий випрямляч чи модернізована стара схема	Підтвердження метрологічними випробуваннями		
	Гарантія		
товар буде захищено ліцензійною голографічною етикетка			

Товар буде захищено як винахід, інтелектуальнц власність

Наступним кроком ми можемо визначити цінові межі, якими необхідно керуватись при встановленні ціни на випрямляч а також аналіз рівня доходів цільової групи споживачів (таблиця 4.17).

Таблиця 4.17 - Визначення меж встановлення ціни [18]

п/п	Рівень цін на товари-замінники	Рівень цін на товари-аналоги	Рівень доходів цільової групи споживачів	Верхня та нижня межі встановлення ціни на товар/послугу
	~5000	4000	~250000- 300000000	3500 - 3800

Визначимо оптимальну систему збуту

Таблиця 4.18 - Формування системи збуту [18]

п/п	Специфіка закупівельної поведінки цільових клієнтів	Функції збуту, які має виконувати постачальник товару	Глибина каналу збуту	Оптимальна система збуту
	Жорстка відповідність держаній системі стандартів та норм	Відповідна якість товару	До кінечного споживача	Замовляння товару інтернетом та державні замовлення за тендером

4.7. Останньою складовою маркетингової програми є розроблення концепції маркетингових комунікацій, що спирається на попередньо обрану основу для позиціонування, визначену специфіку поведінки клієнтів (табл. 4,19). [18]

Таблиця 4.19

Концепція маркетингових комунікацій [18]

п/п	Специфіка поведінки цільових клієнтів	Канали комунікацій, якими користуються цільові клієнти	Ключові позиції, обрані для позиціонування	Завдання рекламного повідомлення	Концепція рекламного звернення
	Вимоги до відповідності держаним стандартам та нормам	Інтернет, система тендерних державних замовлень «прозора»	Економічна перевага, технологічна перевага	Економія та покращення виробничих характеристик	Проведення рекламної інтернет кампанії та низки презентацій цільовим державним структурам

За результатами аналізу, виконаного при розробці стартап проекту була обрана стратегія заняття конкурентної ніші.

Висновки по розділу

В даному розділі представлено стартап, що до зменшення собівартості, оптимізації роботи схеми спеціалізованого високовольтного однофазного випрямляча з подвоєнням напруги та дозволяє зменшити собівартість установки високої напруги. Правильне просування цього проекту дає змогу успішно стартувати на ринку.

Висновки:

1. З урахуванням розвинутої теорії, що вперше дозволяє математично моделювати процеси у схемі спеціалізованого високовольтного однофазного випрямляча з подвоєнням напруги, розроблена методика дослідження впливу навантажувальної ємності на характеристики високовольтного випрямляча.
2. Проведені розрахунки параметрів на основі вирішення системи лінійних та нелінійних рівнянь 7-го порядку, що описують режими роботи високовольтного випрямляча з подвоєнням напруги.
3. В результаті проведених досліджень встановлено, що навантажувальна ємність в схемі джерела є надлишковою, та її можна зменшити в 6 разів без суттєвого погіршення робочих характеристик випрямляча.
4. При зменшенні навантажувальної ємності практично залишається незмінною напруга джерела живлення випрямляча, а пульсація напруги в навантаженні випрямляча не виходить за межі діапазону 5%, що регламентовано ГОСТ 1516.2

Список використаної літератури

1. Бржезицький В. О., Ісакова А.В., Рудакова В.В. та ін. Техніка і електрофізика високих напруг: Навч. посібник / За ред. В. О. Бржезицького та В. М. Михайлова. – Харків: НТУ «ХП» - Торнадо, 2005. – 930с. ISBN 966-635-561-2
2. Dwivedi C. K., Daigavane M. B. Multi-purpose low cost DC high voltage generator (60 kV output), using Cockcroft-Walton voltage multiplier circuit // International Journal of Science and Technology Education Research. – 2011. – Vol. 2(7). – pp. 109-119.
3. Cortez D.F., Barbi I. A Family of High Voltage Gain Single-Phase Hybrid Switched-Capacitor PFC Rectifiers // IEEE Transactions On Power Electronics. – 2015. – Vol. 30. – No. 8. – pp. 4189-4198. doi: 10.1109/TPEL.2014.2360173.
4. Cockroft J.D., Walton E.T.S. Experiments with high velocity positive ions. (I) Further developments in the method of obtaining high velocity positive ions // Proceedings of the Royal Society A. Mathematical, physical and engineering sciences. – 1932. – Vol. 136. – No. 830. – pp. 619-630. doi: 10.1098/rspa.1932.0107.
5. Голомедов, А. В. Полупроводниковые приборы. Диоды выпрямительные, стабилитроны, тиристоры: справочник / А. Б. Гитцевич, А. А. Зайцев, В. В. Мокряков и др.; под ред. А. В. Голомедова. – М.: Радио и связь, 1988. – С. 347-350.
6. Бржезицький В.О., Вендичанський Р.В., Гаран Я.О., Десятов О.М. Обґрунтування вибору стабілітронів і режимів електроживлення еталонних установок високої напруги постійного струму // Наукові вісті НТУУ "КПІ". – 2014. – № 1. – С. 7-13.
7. Бржезицький В.О., Десятов О.М., Сулейманов В.М., Хомініч В.І. Аналіз пульсацій високовольтного каскадного генератора напруги постійного струму // Технологічний аудит та резерви виробництва. – 2015. – № 1/1(21). – С. 56-61.
8. Бржезицький В.О., Десятов О.М., Маслюченко І.М., Анохін Ю.Л. Аналітичне дослідження режимів напруги високовольтного каскадного генератора з нелінійним навантаженням // Наукові праці НУХТ. – 2015. – Том 21. – № 3. – С. 183-191.
9. Бржезицький В. О., Десятов О. М., Гаран Я. О., Бабічева А. А. Аналіз пульсацій струму високовольтного каскадного генератора постійної напруги // Науковий вісник НУБІП України. Серія: техніка та енергетика АПКС. – 2015. – № 209-2. – С. 30-38.

10. Merev A., Hällström J.K. A Reference System for Measuring High-DC Voltage Based on Voltage References // IEEE Transactions On Instrumentation And Measurement. – 2015. – Vol. 64. – No. 1. – pp. 184-189. doi: 10.1109/TIM.2014.2338673.
11. Anokhin Y.L., Brzhezytskyi V.O., Haran Ya.O., Masliuchenko I.M., Protsenko O.P., Trotsenko Ye.O. Application Of High Voltage Dividers For Power Quality Indices Measurement // Electrical Engineering & Electromechanics. – 2017. – No. 6. – pp. 53-59. doi: 10.20998/2074-272X.2017.6.08.
12. Кравченко В.И., Петков А.А. Параметрический синтез высоковольтного импульсного испытательного устройства с емкостным накопителем энергии // Электротехника и электромеханика. – 2007. – № 6. – С. 70-75.
13. Щерба А.А., Супруновская Н.И., Иващенко Д.С. Моделирование нелинейного сопротивления электроискровой нагрузки для синтеза цепи разряда конденсатора по временным характеристикам // Технічна електродинаміка. – 2014. – № 3. – С. 12-18.
14. Супруновская Н.И., Щерба А.А. Процессы перераспределения электрической энергии между параллельно соединенными конденсаторами // Технічна електродинаміка. – 2015. – № 4. – С. 3-11.
15. ДСТУ 3863-99 Державний стандарт України. Метрологія. Державна повірочна схема для засобів вимірювань електричної напруги постійного струму в діапазоні від 1 до 800 кВ, 1999. – 10 с.
16. Trotsenko Ye., Brzhezitsky V., Protsenko O., Chumack V., Haran Ya. Simulation of partial discharges under influence of impulse voltage // Technology audit and production reserves. 2018. Vol. 1, No. 1 (39). P. 36–41. doi: 10.15587/2312-8372.2018.123309.
17. Trotsenko Ye., Brzhezitsky V., Protsenko O., Chumack V., Haran Ya. Effect of voltage harmonics on pulse repetition rate of partial discharges // Technology audit and production reserves. 2018. Vol. 2, No. 1 (40). P. 37–44. doi: 10.15587/2312-8372.2018.126626.
18. Розроблення стартап-проекту [Електронний ресурс] : методичні рекомендації до виконання розділу магістерських дисертацій для студентів інженерних спеціальностей / За заг. ред. О.А. Гавриша, Київ : НТУУ «КПІ», 2016. – 30 с.